

19335

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK YAPILARIN HESABINDA RÜZGAR SPEKTRUMU YÖNTEMİ

DÖKTORA TEZİ

Y. Müh. Ahmet Kutlu ŞANLI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Temmuz 1991

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Ekim 1991

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erdoğan UZGİDER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Vural CİNEMRE

Prof. Dr. Sadettin ÖKTEN

T. C.
Yükseköğretim Bakanlığı
Dokümantasyon ve Yayın
Genel Müdürlüğü

TEMMUZ 1991

ÖNSÖZ

İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Programı çerçevesinde gerçekleştirilen bu doktora çalışmasında, rüzgar etkisi altındaki yüksek yapıların, deplasman ve ivme olarak dinamik cevabının kolay ve sistematik bir şekilde hesaplanabilmesini sağlamak için, bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak deprem analizinde kullanılan, cevap spektrumu yöntemine benzer bir yöntem rüzgar etkileri için geliştirilmiştir.

Bu doktora çalışması boyunca, her konuda sürekli ilgi ve yardımlarını gördüğüm ve değerli fikirlerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Prof.Dr. Erdoğan UZGİDER'e en derin teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca bu konu üzerindeki görüşmelerimiz ve beraber çalışmalarımız sayesinde, fikirlerinden çok yararlandığım Sayın Doç.Dr. Erdal ŞAFAK'a ve çalışmanın başından sonuna kadar her konuda destek olan, ailemin bütün fertlerine de ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Rüzgarın Yapısal Özellikleri	2
1.1.1. Meteorolojinin Temel Kavramları	2
1.1.2. Mühendislik Meteorolojisi	4
1.1.2.1. Yeryüzeyinden İtibaren Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi	5
1.1.2.2. Farklı Pürüzlülükteki Bölgelerin Ortalama Rüzgar Hızına Etkisi.	8
1.1.2.3. Bölgesel Rüzgarlar ve Fırtınalar İçindeki Rüzgar Hızı Profilleri.	8
1.1.2.4. Atmosferik Türbülans	9
1.1.2.4.1. Türbülans Yoğunluğu	9
1.1.2.4.2. Türbülans Spektrası	10
1.1.2.4.3. Türbülansa Ait Çapraz Spektral Yoğunluk Fonksiyonu	12
1.2. Rüzgarın Yapılara Etkisi	13
1.2.1. Aerodinamik	13
1.2.1.1. Temel Prensipler ve İlişkiler	13
1.2.1.1.1. Kütleinin Korunumu Kanunu	13
1.2.1.1.2. Bernoulli Denklemi	14
1.2.1.1.3. Dinamik Basınç	14
1.2.1.1.4. Reynolds Sayısı	15
1.2.1.2. Katı Cisimlerin Çevresinde Hava Akımının Davranışı	15
1.2.1.2.1. Basınç ve Emme Bölgeleri	15
1.2.1.2.2. Akım Ayrılma Mekanizması	16
1.2.1.2.3. Arka Tarafta Kalan Akımlar.	18
1.2.1.2.4. Strouhal Sayısı	19
1.2.1.3. Rüzgarın Yapı Üzerinde Oluşturduğu Kuvvetler	20
1.2.2. Aeroelastisitenin Temel Kavramları	22
1.2.2.1. Rezonans (Lock-In) Etkisi	23
1.2.2.2. Galloping	23
1.2.2.3. Burulma İstabilitesi	24
1.2.2.4. Çırpınma (Flutter)	24
1.3. Rüzgar Tüneli Testleri	25
1.3.1. Model Tipleri	25
1.3.1.1. Model Kesit Testi	25
1.3.1.2. Tam Model Testi	25
1.3.2. Model - Prototip Benzeştirme Tipleri	26
1.3.2.1. Geometrik Benzeşim	26
1.3.2.2. Kinematik Benzeşim	26
1.3.2.3. Dinamik Benzeşim	27
1.3.2.4. Aerodinamik Benzeşim	27
1.3.3. Rüzgar Tüneli Tipleri	28
1.4. Yapıların Rüzgar Etkisine Göre Boyutlandırılması	29

1.4.1. Yapı Dinamiği	29
1.4.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	29
1.4.1.2. Sürekli Kütle Yayılımlı Sistemler	33
1.4.1.3. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	35
1.4.2. Yapıların Rüzgar Yüklerine Cevabının Hesabında Kullanılan Yöntemler.	38
BÖLÜM 2. BU KONUDA YAPILAN ARAŞTIRMALAR.	44
BÖLÜM 3. BU ÇALIŞMANIN AMACI	49
BÖLÜM 4. YÜKSEK YAPILARIN RÜZGAR KUVVETLERİNE KARŞI CEVABI	53
4.1. Yapıya Rüzgarın Esiş Yönünde Gelen Rüzgar Kuvvetleri	54
4.2. Statik Etki	55
4.3. Dinamik Etki	57
4.4. Rüzgar Yönünde Deplasman ve İvmenin Hesaplanması	60
4.5. Yapının Dinamik Cevabının Arka-Plan ve Rezonans Parçaları	65
BÖLÜM 5. DEPREM ANALİZİNDE KULLANILAN SPEKTRUM YÖNTEMİ	69
BÖLÜM 6. RÜZGAR ANALİZİNDE KULLANILMAK ÜZERE MODAL KATKI FAKTÖRÜNÜN HESABI	72
6.1. Rüzgar Spektrumu İçin Referans Sistemin Tanımlanması	73
6.2. Modal Katkı Faktörünün Saptanması	75
6.2.1. I. Sınır Durum : Rüzgar Basınçları Tamamen Koordinatlardan Bağımsız.	78
6.2.2. II. Sınır Durum : Basınçlar Tam Olarak Koordinatlara Bağımlı	79
6.2.3. İvmeler İçin Yüksek Modlarda da Sonuç Veren Bir Katkı Faktörünün Saptanması	82
BÖLÜM 7. RÜZGAR CEVAP SPEKTRUMU EĞRİLERİ	87
BÖLÜM 8. AYRIK SİSTEMLER İÇİN MODAL KATKI VEYA DÜZELTME FAKTÖRLERİNİN HESABI	125
BÖLÜM 8. SAYISAL UYGULAMA	133
BÖLÜM 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	142
KAYNAKLAR	144
ÖZGEÇMİŞ	148

NOTASYON LİSTESİ

$\dot{}$	Zamana göre 1. türev
$\ddot{}$	Zamana göre 2. türev
T	Transpoz
$[]$	Matris gösterilimi
$\{ \}$	Vektör gösterilimi
$A(f_i)$	İvme cevap spektrumu
$a_g(t)$	Yer çekimi ivmesi
B	Yapının rüzgarın esiş yönündeki genişliği
$[C]$	Sönüm değerleri matrisi
C_D	Boyutsuz rüzgar itki katsayısı
C_e	Açıklık faktörü
C_g	Darbe faktörü
C_i^*	i . moda ait genelleştirilmiş sönüm oranı
$C_l(z)$	Yapının arka tarafındaki emme katsayısı
C_L	Boyutsuz, rüzgara dik yönde oluşan kuvvet katsayısı
$C_m(z)$	Boyutsuz kütle katsayısı
C_M	Boyutsuz aerodinamik moment katsayısı
C_p	Toplam boyutsuz basınç katsayısı
$C_w(z)$	Yapının rüzgar yüzeyindeki boyutsuz basınç katsayısı
C_y	Koherins fonksiyonunda geçen azalma katsayısı
C_z	Koherins fonksiyonunda geçen azalma katsayısı
C_{oh}	Koherins fonksiyonu
D	Hava akımı içindeki cismin çapı

$D(f_i)$	Deplasman cevap spektrumu
f_i	i . moda ait yapı doğal frekansı
F_i^*	i . moda ait genelleştirilmiş kuvvet
f_{id}	i . moda ait sönümlü yapı doğal frekansı
$F(t)$	Dış kuvvet
f	Frekans
$g_a(z)$	İvme için darbe faktörü
$g_y(z)$	Deplasman için darbe faktörü
H	Yapı yüksekliği
$H_1(f)$	Transfer fonksiyonu
$[K]$	Rijitlik değerleri matrisi
k_{1i}	i . moda ait, modal katkı veya düzeltme faktörü üst sınırı
k_{2i}	i . moda ait, modal katkı veya düzeltme faktörü alt sınırı
k_{ai}	i . moda ait, ivme için modal katkı veya düzeltme faktörü
K_i^*	i . moda ait, genelleştirilmiş rijitlik değeri
k_{yi}	i . moda ait, deplasman için modal katkı veya düzeltme faktörü
$k_{y\sigma_i}$	i . moda ait, gerçek ve referans yapı deplasmanlarının RMS leri arasındaki oran
$k_{a\sigma_i}$	i . moda ait, gerçek ve referans yapı ivmelerinin RMS leri arasındaki oran
$[M]$	Kütle değerleri matrisi
m	Yapı birim yüksekliğince kütle
m_k	k . katın kütle değeri
M_i^*	i . moda ait genelleştirilmiş kütle
N_1	Yapı üzerinde bir nokta
n_s	Vortekslerin frekansı
N_u	Yapının ön ve arka yüzleri arasındaki koherins fonksiyonu
p	Rüzgar basıncı
$P_o(z)$	Rüzgar kuvvetinin ortalama parçası

p_o	Atmosfer basıncı
$p(z,t)$	Rüzgar kuvvetinin zamana bağlı değişen parçası
$P(z,t)$	Toplam rüzgar kuvveti
q	Dinamik rüzgar basıncı
$Q_i(f)$	Aerodinamik transfer fonksiyonu
q_i	i . moda ait genelleştirilmiş koordinat
Re	Reynolds sayısı
S	Strouhal sayısı
$S_a(f)$	Yapının ivme cevabının spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_F(f)$	Yapıya etkiyen kuvvetin spektral yoğunluk fonksiyonu
S_w	Rüzgar hızının zamana bağlı parçasının spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_y(f)$	Yapının deplasman cevabının spektral yoğunluk fonksiyonu
T	Pik hesaplamaları için dikkate alınan etki süresi
t	Zaman
u_*	Sürtünme hızı
$V_o(z)$	Rüzgar hızının ortalama değeri
$V(z,t)$	Rüzgar hızı
$w(z,t)$	Rüzgar hızının zamana bağlı parçası
y	Yanal deplasman
$\dot{y}$	Yanal hız
$\ddot{y}$	Yanal ivme
z_G	Gradyant yükseklik
z_o	Pürüzlülük uzunluğu
z_r	Yerden itibaren rüzgar hızının değişmediği kabul edilen yükseklik
z	Düşey koordinat
α	Ortalama rüzgar hızı ifadesinde üs şeklinde bir katsayı
$\delta(x)$	Delta Dirak fonksiyonu
$\{\mu_i\}$	i . moda ait mod şekli vektörü

ν	Kinematik viskosite
ν_a	Birim zamanda, ivme fonksiyonu içinde oluşan piklerin ortalama sayısı
ν_y	Birim zamanda, deplasman fonksiyonu içinde oluşan piklerin ortalama sayısı
μ_i	i . mod şekil fonksiyonu
ρ	Havanın yoğunluğu
σ	Kareler ortalamasının karekökü (RMS)
σ_a	Yanal ivme değerlerinin kareleri ortalamasının karekökü
σ_y	Yanal deplasman değerlerinin kareleri ortalamasının karekökü
ξ_i	i . moda ait yapı sönüm oranı



ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1-1. Genel bir rüzgar kaydı.
- Şekil 1-2. Rüzgar hızının ortalama ve zamana bağılı olarak değişen parçaları.
- Şekil 1-3. Yer yüzeyine yakın yerlerde rüzgar hız profili.
- Şekil 1-4. Farklı boyuttaki iki alan arasındaki hava akım çizgileri.
- Şekil 1-5. Dikdörtgen şeklindeki bir yapı etrafında akım çizgileri.
- Şekil 1-6. Rijit bir cismin yakınında oluşan sınır tabakası.
- Şekil 1-7. Keskin kenarlı yapılar etrafındaki hava akım çizgileri.
- Şekil 1-8. Silindirik bir cismin üzerindeki ayrılma noktaları
a.) Sınır tabakası laminar karakterdeyse,
b.) Sınır tabakası türbülanslı ise,
- Şekil 1-9. Şematik vorteks yolu
- Şekil 1-10. Silindirik bir cismin etrafındaki akımlarda, Reynolds sayısına bağılı olarak Strouhal sayısının ve cismin arka tarafında oluşan vortekslerin dağılımının değişimi.
- Şekil 1-11. Rüzgar etkisindeki bir cisme rüzgarın esiş yönünde ve ona dik yönde etkiyen kuvvetler.
- Şekil 1-12. Dikdörtgen şeklindeki cisimlerin üzerine, rüzgarın esiş yönünde etkiyen kuvvetlerin B/H oranına bağımlılığı.
- Şekil 1-13. Hava akımı içindeki silindirik cisimlerin üzerine etkiyen, akım yönündeki kuvvetin Reynolds sayısına bağımlılığı.
- Şekil 1-14. "D" Şeklinde enkesite sahip cisimlerde oluşan "galloping" etkisi.
- Şekil 1-15. Burulma instabilitesine maruz yapı tipi.
- Şekil 1-16. Tek serbestlik dereceli sistemin şematik gösterilimi.
- Şekil 1-17. Yapı üzerine etkiyen, zamana bağılı bir yükün ardarda gelen impuls-lar şeklinde toplanması.
- Şekil 1-18. $H_1^2(f)$ fonksiyonu
- Şekil 1-19. Bir sisteme etkiyen kuvvet ve buna cevabın spektral yoğunluk fonk-siyonları.
- Şekil 1-20. Aerodinamik kuvvetin kaydı $F(t)$.

- Şekil 1-21. $F(t)$ kuvvetine karşı yapının $y(t)$ cevabının kaydı.
- Şekil 1-22. Sürekli parametrelili sistemler.
- Şekil 1-23. Yüksek yapılara ait mod şekilleri
- Şekil 4-1. Rüzgar etkisindeki bir yüksek yapının boyutları.
- Şekil 4-2. Beyaz gürültünün spektral yoğunluk fonksiyonu.
- Şekil 4-3. Yapının modal mekanik transfer fonksiyonunun modülünün karesi
- Şekil 4-4. Azalan spektral yoğunluk fonksiyonu eğrisi
- Şekil 5-1. Yerçekimi ivmesi etkisinde, sönümlü ve tek serbestlik dereceli bir sistem.
- Şekil 6-1. Cevap spektrumlarının üretilmesinde kullanılan tek serbestlik dereceli referans yapının şematik gösterilimi.
- Şekil 6-2. $S_{F_i}^*$ integralinin, yapının ilk üç modu için değişik doğal frekans değerlerindeki sonuçları.
- Şekil 7-1. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-2. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-3. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-4. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-5. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-6. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-7. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-8. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-9. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-10. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-11. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)

- Şekil 7-12. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-13. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-14. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-15. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-16. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-17. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-18. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-19. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-20. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-21. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-22. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-23. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-24. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-25. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-26. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-27. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)
- Şekil 7-28. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)
- Şekil 7-29. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)
- Şekil 7-30. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)

Şekil 7-31. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)

Şekil 7-32. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)

Şekil 7-33. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)

Şekil 7-34. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)

Şekil 7-35. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)

Şekil 7-36. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
($S_{\text{önüm}} = 0.05$, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)

Şekil 8-1. Bir yüksek yapının mod şekilleri

Şekil 8-2. a.) Rüzgar profili
b.) Koherins fonksiyonunun K ve K^* değerlerinin yükseklikle değişimi

Şekil 9-1. Örnek yapının şematik gösterilimi.

TABLO LİSTESİ

- Tablo 1-1. Bölge sınıfına göre α değerinin değişimi
- Tablo 1-2. Bölge sınıfına göre z_o değerinin değişimi
- Tablo 1-3. Bölge sınıfına göre p değerinin değişimi
- Tablo 1-4. Bölge sınıfına göre β değerinin değişimi
- Tablo 9-1. Örnek yapıda kullanılan kesit tipleri ve özellikleri.
- Tablo 9-2. Örnek yapıya ait doğal frekans değerleri (Hz)
- Tablo 9-3. Örnek yapının ilk beş moduna ait mod şekli vektörleri.
- Tablo 9-4. Örnek yapıya ait gerçek statik deplasman, dinamik deplasman ve ivme değerleri.
- Tablo 9-5. İlk beş modu hesaba katarak elde edilen sonuca göre, daha az mod alarak hesap yapılması halinde ortaya çıkan rölatif hata miktarları.
- Tablo 9-6. Örnek yapının doğal frekanslarına karşılık gelen spektrum değerleri.
- Tablo 9-7. Modal katkı veya düzeltme faktörleri.
- Tablo 9-8. Örnek yapının cevap spektrumu yöntemiyle hesaplanan dinamik deplasman ve ivme değerleri.

ÖZET

Rüzgar yükleri, yüksek yapıların boyutlandırılmasında gözönünde tutulan belli başlı yüklerden birisidir. Bu yükün dinamik karakterinin, birçok halde statik olandan daha etkin olabildiği ispatlanmıştır. Bu nedenle de, rüzgarın dinamik etkisi yük standartlarının yapısına da girmiştir. Şu anda standartlarca önerilen ve pratikte kullanılan yöntem eşdeğer statik yük yöntemidir. Bu yöntemde rüzgarın statik ve dinamik etkilerinin beraberce yapıda oluşturacağı deplasmanı tek başına oluşturabilecek bir eşdeğer yük belirlenir ve yapıya bu yüklenir. Bu şekilde yapının sadece deplasman cevabı elde edilebilir. Bu yöntemde, rüzgarın dinamik etkisi nedeniyle yapıda oluşan ivme değerleri belirlenemediğinden boyutlandırmada sınırlayıcı kriterler sadece deplasman ve gerilme olmaktadır. Bu nedenle özellikle yüksek yapıda çok önemli olan ivme ile ilgili konfor kriterlerinin dikkate alınması mümkün değildir.

Bu çalışmada yüksek yapıların rüzgar etkisi altındaki dinamik cevabının (deplasman ve ivme) hesaplanabilmesi amacıyla bir cevap spektrumu yöntemi geliştirilmiştir. Bu teknik şu anda deprem yükleri için kullanılmakta olan cevap spektrumu yöntemine oldukça benzemektedir. Bu sayede, sadece yapıda oluşacak en büyük deplasmanlar hesaplanmakla kalmayıp, aynı zamanda yapının tepesinde yükün etki süresi içinde oluşacak en büyük ivme değeri de elde edilebilmektedir.

Bu çalışmanın kapsamı içinde yapıya rüzgarın esiş yönünde etkiyen kuvvetler ve yapının da bu yöndeki cevabı dikkate alınmaktadır. Yöntem temel olarak üç aşamada uygulanmaktadır. İlk olarak, temel hizasından yere dönel bir yay ve titreşim söndürücü ile bağlanmış, tek serbestlik dereceli, birim kütle dağılımına sahip ve dikdörtgen şeklindeki rijit bir blok olarak tanımlanan bir referans yapının, gerçek yapıyı etkileyen rüzgar altında yaptığı en büyük tepe deplasman ve ivmeleri daha önceden hazırlanmış diyagramlardan yararlanarak belirlenir. Bu nedenle yapı parametrelerinin ve rüzgar şiddetinin değişik kombinasyonları için 108 adet bu anlamda diyagram hazırlanmış ve çalışmanın içinde sunulmuştur.

İkinci olarak gerçek yapıya ait mod şekil vektörleri bilinen standart yollardan herhangi birisiyle tespit edilir. Daha sonra bu gerçek mod şekillerini ve yapının gerçek parametrelerini dikkate alarak, bu çalışmada geliştirilmiş olan modal katkı veya düzeltme faktörleri hesaplanır.

Son olarak bu katsayılar daha önceden belirlenmiş olan, referans yapıya ait spektrum değerleriyle çarpılarak gerçek yapının rüzgarın dinamik etkisine cevabı hesaplanır. Modal katkı veya düzeltme faktörleri çıkartılırken iki sınır değeri tespit edilmiştir. Gerçek sonuç bu iki değerin arasında çıkmaktadır. Bu sınır değerler birinci mod için birbirlerine çok yakın olduklarından, sadece birinci modun dikkate alınmasının yeterli olduğu deplasman hesabında direkt olarak kullanılabilirler. Bu çalışmada yüksek modların etkisinin önemli olduğu ivme hesabında da kullanılabilen ve daha doğru sonuç veren bir modal katkı veya düzeltme faktörü ifadesi de geliştirilmiştir. Bu yönteme göre çözülen örneklerde yapılan hatanın %5 in altında olduğu tespit edilmiştir.

SUMMARY

WIND RESPONSE TECHNIQUES FOR CALCULATION OF HIGH-RISE BUILDINGS

INTRODUCTION

Wind loading is one of the most important factors to be considered in designing high-rise buildings. The dynamic component of wind forces have long been recognized and incorporated in design codes. The current practice of design for wind is based on the equivalent static load, under which the static deflection of the building is equal to the dynamic deflection [4, 5]. This load, along with the static component of wind load, are applied to the building, and a static analysis is performed for design. This approach is known as the gust factor approach [1]. The design criterion for the gust factor method is to limit the stress and deflections, same as for any other static load, since the method is based on the equivalent static load concept. It is well known, however, that one of the major problems in high-rise buildings is the wind-induced discomfort of occupants. The occupant discomfort occurs due to excessive acceleration, rather than deflections. This observation suggests that the wind design criterion of high-rise buildings should be based on peak accelerations, as well as peak displacements. Current codes do not have any provision for wind-induced peak accelerations. Using existing theory, analytical expression can be developed for peak accelerations [3, 28]. However, the expressions are probably too complex to use for practicing design engineers. There is a need for a simple wind design methodology, that will not only incorporate peak displacements and peak accelerations, but also will be consistent with the current methods of analysis, so that design engineers can easily adopt it.

One such method is the response spectrum method. Response spectrum method has been widely used for earthquake design, and is well known among engineers. It is very simple, and can incorporate peak accelerations, velocities, and displacements. It was first suggested Newmark [36], and later shown by Cevallos-Candau [37], that the earthquake and wind loads, and corresponding building responses have a lot of similarities. Therefore, similar methods of analysis, such as the response spectrum technique, can be used for both loads. An important advantage of using the response spectrum technique for both wind and earthquake loads is that, when both loads need to be considered for design, the designer would know beforehand which load will dominate his design, without doing a separate analysis for each load.

In this study, a response spectrum technique presented for predicting wind-induced response of high-rise buildings. The technique is similar to that used for earthquake loads, and incorporates not only peak displacements, but also peak accelerations of the building. Therefore, the method can be used for design for safety (i.e., considers peak displacements), and also for design for comfort (i.e., considers peak accelerations). In this study current techniques used for wind and earthquake response analysis of structures will be first outlined. Then how the

random vibration technique used for wind loads can be put into a response spectrum form will be explained. Following this wind response spectra for different wind and terrain conditions will be presented, and a parametric analysis to investigate the effect of various parameters on spectra will be performed. It is show that existing computer programs that perform spectral analysis for earthquake loads can be easily modified to perform spectral analysis for wind loads as well as earthquake loads.

WIND FORCES ON HIGH-RISE BUILDINGS

Wind induced vibrations in high-rise buildings are due to individual or combined effects of following dynamic force mechanisms in the wind: along-wind forces due to turbulence, across-wind forces due to vortex shedding, wake buffeting, and galloping. Along-wind forces are in the direction of main wind flow. They induced static and dynamic component, generated by the steady and fluctuating components of the wind, respectively, and are the most dominant force mechanism in a typical building. In general, along-wind forces are in the form of pressures on the frontal (i.e., windward) face, and suctions on the back (i.e., leeward) face of the building. Across-wind forces are generated by vortecies that develop at the sides of the building moving clockwise and counterclockwise, and shed in an alternating fashion in the direction perpendicular to the mean wind flow. Across-wind forces can be critical for slender buildings, such as buildings with very large height to width ratios, smokestacks, and transmission towers. Wake buffeting occurs if one structure is located in the wake of another structure, and can cause large oscillations in the downstream structure if the two structures are similar in shape and size, and less than ten-diameter apart. Galloping is an oscillation induced by the forces which are generated by the motion itself. It corresponds to an unstable motion with negative damping, and can be seen in structures like transmission lines, or long slender towers with sharp edgedcrosssections. More detail on wind force mechanism can be found in Simiu and Scanlan [3] and Safak and Foutch [28]. In this study, only the along-wind forces in the direction of main wind flow will be dealed.

RESPONSE SPECTRA FOR WIND LOADS

Development of response spectra for wind loads can be accomplished following a similar approach to that for earthquake loads. As earthquake spectra, wind response spectra should also be defined for a given site, since the velocity and turbulence structure of the wind is strongly site dependent. Earthquake loads are inertia loads, therefore the spectral response involves only the damping and the natural frequency of the structures, but no any other structural parameter. Wind loads, however, are strongly dependent on the outside geometry of the structure. They are the size and the shape of the wind exposure area that determine the total wind load on the building. Therefore, the wind response is dependent not only on the natural frequency and damping, but also on outside geometry of the structure. Since we are dealing with buildings with rectengular cross-section and normally incident wind, and also considering only along-wind vibrations at this phase of the study, we can define the outside geometry in terms of the height and frontal width of the building. Further simplification can be achived for very tall buildings by neglecting the variation of wind pressures in the horizontal direction and using pressure coefficients avaraged over the height of the building. In the formulation that follows both the height and the width of the building will be considered. Wind response spectra for a given site, and given structural damping, height, and height to width ratio will be considered. The dependence of wind response spectra on

height and height to width ratio is the major difference when compared to earthquake response spectra.

A reference building for wind spectra:

In order to develop wind response spectra, we will consider a reference building as schematically shown in Fig.6-1 will be considered. The reference building can be visualised as a rigid block of specified width, height, and mass, connected to the base by a rotational spring-dashpot system. Therefore, the reference system is a SDOF system, and its single mode shape is a straight line. For the reference system for different damping ratios, wind velocities, heights, and height-to-width ratios a wind response spectra will be developed. It is assumed that the reference system has unit mass per unit height, and a location in the middle of the city.

Using the coordinate system shown in Fig.6-1, It is possible to write for the response of the reference system as

$$y_r(z,t) = \mu_r(z)q_r(t) \dots \dots \dots (1)$$

where $\mu_r(z)$ denotes the single mode shape of the system. Since the building has only one degree of freedom, the rigid body rotation with respect to base, one can write, for the mode shape

$$\mu_r(z) = \frac{z}{H} \dots \dots \dots (2)$$

The equation for $q_r(t)$, can be obtained as,

$$\ddot{q}_r(t) + 2\xi_{or}(2\pi f_{or})\dot{q}_r(t) + (2\pi f_{or})^2 q_r(t) = \frac{F_r^*(t)}{M_r^*} \dots \dots \dots (3)$$

where ξ_{or} and f_{or} are the damping ratio and natural frequency, and F_r^* and M_r^* are the generalized load and mass of the reference building, respectively. For unit mass per unit length, one can calculate the generalized mass of the reference system as

$$M_r^* = \int_0^H \mu_r^2(z) \cdot 1 \cdot dz = \int_0^H \left(\frac{z}{H}\right)^2 dz = \frac{H}{3} \dots \dots \dots (4)$$

One can write for the PSDF, $S_{y_r}(z_1, z_2, f)$, of the displacement response of the reference system

$$S_{y_r}(z_1, z_2, f) = \mu_r(z_1)\mu_r(z_2)|H(f)|^2(\rho C_D B)^2 V_o(z_1)V_o(z_2) \\ S_w^{1/2}(z_1, f)S_w^{1/2}(z_2, f)Coh(z_1, z_2, f) \dots \dots \dots (5)$$

The PSDF for the acceleration is

$$S_{a_r}(z_1, z_2, f) = (2\pi f)^4 S_{y_r}(z_1, z_2, f) \dots \dots \dots (6)$$

The RMS displacement $\sigma_{y_r}(H)$, and the RMS acceleration $\sigma_{a_r}(H)$ at the top of the building are

$$\sigma_{y_r}(H) = \int_0^\infty S_{y_r}(H, f) df \quad \text{and} \quad \sigma_{a_r}(H) = \int_0^\infty S_{a_r}(H, f) df \dots \dots \dots (7)$$

For the peak displacement, $\max_t y_r(H, t)$, and the peak acceleration $\max_t a_r(H, t)$, at the top, one can write

$$\max_t y_r(H, t) = y_{or}(H) + g_{y_r}(H) \sigma_{y_r}(H) \dots \dots \dots (8)$$

$$\max_t a_r(H, t) = g_{a_r}(H) \sigma_{a_r}(H) \dots \dots \dots (9)$$

where $y_{or}(H)$ is the static displacement due to static wind load, and $g_{y_r}(H)$ and $g_{a_r}(H)$ are the displacement and acceleration peak factors, respectively, at the top of the reference system.

For the displacement response spectra, only the dynamic displacement will be considered, since the static displacement can easily be calculated using static analysis. It should be noted here that, if desired, the static displacement can also be included in the response spectrum by expanding it into static modal components. We will define the displacement response spectra as the plot of the peak dynamic displacement response at the top of the reference building against the natural frequency for a range of frequencies. Therefore, for the natural frequency f_{oj} the displacement spectra, $D(f_{oj})$, is

$$D(f_{oj}) = \max_t [y_r(H, t)]_{dynamic} = g_{y_r}(H) \sigma_{y_r}(H) \dots \dots \dots (10)$$

Similarly for the acceleration spectra, it is possible to write

$$A(f_{oj}) = \max_t a_r(H, t) = g_{a_r}(H) \sigma_{a_r}(H) \dots \dots \dots (11)$$

Modal Participation Factors for Wind Spectra

In order to calculate the wind response of a given building by using the response spectra of the reference building, one has to determine the modal participation factor first which will be defined as ratio of the peak modal response of a given system to that of the reference system that has the same modal frequency and damping.

The PSDF, $S_{y_r}(f)$, of the j .th modal displacement of a given building is

$$S_{y_j}(z, f) = \mu_j^2(z) |H_j(f)|^2 S_{F_j}^*(f) \dots \dots \dots (12)$$

where $H_j(f)$, the frequency response function for the j .th mode, can be written as,

$$H_j(f) = \frac{1}{M_j^* [-(2\pi f)^2 + i(2\pi f)(2\xi_{oj})(2\pi f_{oj}) + (2\pi f_{oj})^2]} \dots \dots \dots (13)$$

The PSDF of the reference system, $S_{rj}(f)$, corresponding to j . th mode (i.e., the reference system with frequency f_{oj} , damping $2\xi_{oj}$, and same outside dimensions) is

$$S_{rj}(z,f) = \mu_r^2(z) |H_{rj}(f)|^2 S_{F_{rj}}^*(f) \dots \dots \dots (14)$$

The frequency response function of the reference system, H_{rj} , is the same as that of the actual system for the j .th mode, $H_j(f)$, except the scaling factor (i.e., the mass term). The relationship can be written as

$$H_{rj}(f) = \frac{M_r^*}{M_j^*} \cdot H_j(f) \dots \dots \dots (15)$$

Since the loading on the reference and actual systems are the same, and their frequency response functions are equal with a scaling factor, it is concluded that the spectral contents of the modal response and the response of the corresponding reference system are the same. Therefore the peak factors for each response can be assumed equal. Consequently, the ratio of the peak modal response to the peak response of the corresponding reference system is equal to the ratio of their RMS responses. If this ratio denoted by $k_j(k)$ for the responses at height z , one can write

$$k_j^2(z) = \frac{\sigma_{y_j}^2(z)}{\sigma_{\eta_j}^2(z)} = \frac{\int_0^\infty S_{y_j}(z,f) df}{\int_0^\infty S_{\eta_j}(z,f) df} \dots \dots \dots (16)$$

Because of the four-fold integration involved in the calculations of $S_{F_{rj}}^*(f)$ and $S_{F_{rj}}^*(f)$, a straightforward evaluation of $k_j(z)$ is very complicated, and would not have much practical use. To simplify the calculations, one may consider two extreme cases regarding the spatial correlation of the pressures. Case-1 will be to the situation where the pressures are spatially uncorrelated, whereas Case-2 will refer to the situation where the pressures are fully correlated. In addition, it is assumed that the PSDF of velocity fluctuations is independent of the height as suggested by Davenport [1]. The simplified expressions for $k_j(z)$ can then be developed as follows:

Case-1: Pressures are spatially uncorrelated

If the pressures are uncorrelated it is assumed that

$$Coh(x_1, z_1, x_2, z_2, f) = \delta(x_1 - x_2) \delta(z_1 - z_2) \dots \dots \dots (17)$$

where δ denotes the Dirac's delta function. Using this expression, and also with the assumption that $S_w(f)$ is independent of z , it can be shown that

$$S_{F_j^*}(f) = (\rho B_j)^2 S_w(f) \int_0^H C_p^2(z) \mu_j^2(z) V_o^2(z) dz \dots\dots\dots (18)$$

It is assumed that $C_p(z)$ can be taken out of the integral by using an averaged pressure coefficient, C_D , calculated as

$$C_D = \frac{1}{BH} \int_0^H \int_0^B C_p(z) dx dz \dots\dots\dots (19)$$

One, therefore, can write for the PSDF of the j 'th modal response at the top

$$S_{y_j}(H,f) = \mu_j^2(H) (\rho C_D B_j)^2 |H_j(f)|^2 S_w(f) \int_0^H \mu_j^2(z) V_o^2(z) dz \dots\dots\dots (20)$$

Similarly, for the reference system

$$S_{r_j}(H,f) = \mu_r^2(H) (\rho C_D B_j)^2 |H_{r_j}(f)|^2 S_w(f) \int_0^H \mu_r^2(z) V_o^2(z) dz \dots\dots\dots (21)$$

For Case-1, the ratio of the top-story RMS responses $k_{1j}(H)$, from Eq.16 and also using Eq.15, becomes

$$k_{1j}(H) = \frac{\mu_j(H)}{\mu_r(H)} \frac{M_r^*}{M_j^*} \left[\frac{\int_j^H \mu_j^2(z) V_o^2(z) dz}{\int_j^H \mu_r^2(z) V_o^2(z) dz} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (22)$$

Case-2: Pressures are fully correlated

If the pressures are fully correlated, the coherence function is unity, that is

$$Coh(x_1, z_1, x_2, z_2, f) = 1 \dots\dots\dots (23)$$

The PSDF of the generalized force then becomes

$$S_{F_j^*}(f) = (\rho B_j)^2 S_w(f) \left[\int_0^H C_p(z) \mu_j(z) V_o(z) dz \right]^2 \dots\dots\dots (24)$$

Using the same approximation as in Case-1 for $C_p(z)$, one can write for the PSDF of the j 'th modal response at the top

$$S_{y_j}(H,f) = \mu_j^2(H) (\rho C_D B_j)^2 |H_j(f)|^2 S_w(f) \left[\int_0^H \mu_j(z) V_o(z) dz \right]^2 \dots\dots\dots (25)$$

and similarly for the reference system

$$S_{\eta}(H,f) = \mu_r^2(H)(\rho C_D B_j)^2 |H_{\eta}(f)|^2 S_w(f) \left[\int_0^H \mu_r(z) V_o(z) dz \right]^2 \dots \dots (26)$$

The ratio of the RMS responses $k_{2j}(H)$, becomes

$$k_{2j}(H) = \frac{\mu_j(H)}{\mu_r(H)} \frac{M_r^*}{M_j^*} \frac{\int_j^H \mu_j(z) V_o(z) dz}{\int_j^H \mu_r(z) V_o(z) dz} \dots \dots \dots (27)$$

As stated earlier, since the peak factors for the modal response and the corresponding reference system response are equal, these ratios are also valid for the peak responses. Therefore, the peak value of the j 'th modal response at the top, $\max_t y_j(H,t)$, can be calculated in terms of the response ratio and the peak response of the reference system as

$$\max_t y_j(H,t) = k_j(H) \max_t y_r(H,t) \dots \dots \dots (28)$$

Since we defined $\max_t y_r(H,t)$ as the spectral response (Eq.10), one can calculate the peak modal response as

$$\max_t y_j(H,t) = k_j(H) D(f_{oj}) \dots \dots \dots (29)$$

The total peak response can be approximated by combining peak modal responses. If SRSS (square-root-of-sum-of-squares) method is used for the combination, the total peak response becomes

$$\max_t y(H,t) = \left[\sum_{j=1}^n \left(\max_t y_j(H,t) \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\sum_{j=1}^n k_j^2(H) D^2(f_{oj}) \right]^{1/2} \dots \dots \dots (30)$$

The equations for accelerations are similar. Since the relationship between accelerations and displacements is the function of frequency only, the ratios k_{1j} and k_{2j} calculated for displacements are also valid for the accelerations. Therefore, one can calculate the peak top-story acceleration for the j 'th mode, $\max_t a_j(H,t)$ in terms of the spectral acceleration of the reference system as

$$\max_t a_j(H,t) = k_j(H) A(f_{oj}) \dots \dots \dots (31)$$

The total peak acceleration is obtained by combining the peak modal accelerations as in Eq.30.

For given building, the value of $k_j(z)$ is somewhere between $k_{1j}(z)$ and $k_{2j}(z)$. There is no way of knowing the exact values without explicitly incorporating the correlation structure of the wind. Therefore, an approximation needs to be made regarding which value to use for $k_j(z)$. For the first mode, the two values

would be very close since the first mode shape in most buildings is almost a straight line, same as that of the reference building. For higher modes, the ratio $k_{1j}(z)$ would always be larger than the ratio $k_{2j}(z)$, because the value of the integral $\int \mu_j^2(z) V_o^2(z) dz$ is always larger than that of $\int \mu_j(z) V_o(z) dz$ (the negative portions of mode shapes become positive in the first integral due to square), whereas the values for the integrals $\int \mu_r^2(z) V_o^2(z) dz$ and $\int \mu_r(z) V_o(z) dz$ are always close.

Since, for the most of the multi-story buildings participation of higher modes other than first mode are not significant and can be ignored in dynamic displacement calculations, above given participation factors can suitably be used for this purpose. However, for accelerations, participation of higher modes are significant and can not be ignored. Thus, the modal participation factors defined previously for two limit cases are not suitable for acceleration calculations. Because of this, in the final part of this study, employing a suitable simplification for the four-fold integration involved in the calculations of $S_{F_j}^*(f)$ and $S_{F_{rj}}^*(f)$, a simple and efficient expression for $k_i(z)$ has been obtained which works properly for the higher modes.



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Rüzgar, dünya yüzeyinde bulunan bütün yapılara etkileyen asal yüklerden birisidir. Her sene rüzgar etkisi nedeniyle oluşan hasarlar, dünya üzerinde trilyonlarca liralık kaynağın yok olmasına sebep olmaktadır. Geçen on yıl içinde yapılarda kullanılan malzemelerin formunun ve özelliklerinin değişmesi, yani daha yüksek mukavemette daha hafif malzemelerin üretilmiş olması, ayrıca perçin yerine kaynak ve bulon gibi bağlantı sistemlerinin kullanılmaya başlanmış olması, yapı fleksibilitesinin artmasına ve sönüm oranının azalmasına yol açmıştır. Bunun sonucu olarak da, yapılar dinamik rüzgar yüklerine daha hassas hale gelmiştir.

Ülkemizde, dünya üzerindeki birçok ülkenin fazlasıyla zarar gördüğü şiddetli rüzgar etkilerine sıkça rastlanmamaktadır. Bu nedenle yapılan projelerde, yapıların rüzgar analizleri ciddi şekilde ele alınmamaktadır. Ancak bacalar, soğutma kuleleri, yüksek yapılar, asma köprüler gibi narin yapılarda hafif olarak düşünülen rüzgar etkileri bile oldukça önemli tesirler oluşturabilmektedirler.

Yakın zamana kadar yapılar üzerindeki bütün rüzgar analizleri rüzgar etkisinin statik bileşeni ve bunların oluşturduğu deplasmanları incelemekten öteye gitmiyordu. 1940 yılında, Amerika Birleşik Devletlerinde narin yapı bir köprü kuvvetli bir fırtına sırasında aşırı titreşimler yaparak yıkıldı. Takoma Narrows isimli bu köprünün yıkılması olayı, rüzgarın dinamik etkisinin, bazen statik etkisinin yanında çok önemli olabileceğine dikkat çekmesi açısından rüzgar mühendisliğinin dönüm noktalarından birisi olarak kabul edilmektedir. Asıl dinamik incelemeler, bu olayın arkasından hız kazanmıştır.

Yapıların üzerindeki dinamik rüzgar etkisi, aşağıdaki üç temel etkinin teker, teker veya beraberce ortaya çıkmasıyla oluşur:

- 1.) Çalkantı (Türbulans) nedeniyle oluşan çarpma etkisi. Bu kuvvet yapıya rüzgarın esiş yönünde etkir.

2.) Yapının arka tarafında oluşan girdaplar (Vorteks) nedeniyle ortaya çıkan, rüzgar esiş yönüne dik yöndeki kuvvetler.

3.) Titreşimler sonucunda oluşan aerodinamik stabilite bozukluğu.

Doğal rüzgarın içindeki türbülans yapısı rastgele özelliktedir. Rüzgarın yapısına göre ve yerden yere değişim gösterir. Bu nedenle, yapıların rüzgara karşı analizinin probobilistik metotlarla yapılması gerekir. Bu konudaki çalışmalar, matematik modellerin rastgele titreşim teorisine göre incelenmesi, arazi testleri ve rüzgar tuneli testleri dallarında yapılmaktadır. Bu çalışmalarda Davenport ve Vickery' nin isimlerine sıkça rastlanmaktadır. Yapıların boyutlandırılmasındaki uygulamalarının temelleri de, yine Davenport, Vickery, Velozzi, Cohen gibi araştırmacılar tarafından atılmıştır.

Aerodinamik instabilitenin dayandığı ana teoriler, uçan yapıların dizaynına ilişkin teorilerdir. Bu tip problemlere inşaat mühendisliğinde asma köprüler, kablolar veya çubuklar gibi narin ve fleksibil yapılar veya elemanlarda rastlanır. Gerçek aerodinamik yapısı oldukça karmaşıktır. Genel uygulamaları matematiksel olarak modellemek oldukça zordur. Bu nedenle de bu tip problemlere daha çok rüzgar tuneli testleriyle çözüm aranmaktadır.

1.1. RÜZGARIN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

1.1.1. Meteorolojinin Temel Kavramları

Rüzgar, genel olarak havanın hareket etmesi olayıdır. Havanın hareket etmesi için gereken enerjinin kaynağı ise güneştir. Dünya yüzeyindeki rüzgarlar, esas olarak şu iki faktörden ortaya çıkar.

i.) Güneş radyasyonu dünya yüzeyinin değişik bölgelerini farklı şekilde ısıtır. Yani, ekvator daha fazla ısınırken kutuplar daha az ısınmaktadır. Isınan hava yükselir ve basıncı artar. Bu basınç farklılıklarının dengelebilmesi için hava yüksek basınçlı taraftan düşük basınçlı tarafa doğru akar.

ii.) Dünya kendi eksenini etrafında belirli bir hızda dönmektedir. Hava, kütlelerinin ataleti ve gaz yapısında olması nedeniyle, bu hıza tam olarak

uyamaz. İçinde merkezkaç ve sürtünme kuvvetleri oluşur. Bu kuvvetlerin dengelenebilmesi için hava hareket eder ve rüzgarlar oluşur. Bu etki Coriolis Etkisi olarak isimlendirilir.

Dünya yüzeyinin topografik özelliği nedeniyle, hava akımı dünya yüzeyine yaklaştıkça yavaşlar. Efektif olarak yüzeyde sıfırdır. Bu yavaşlama, bölgesel pürüzlülüğe, yani yapının şehir içinde veya açık arazide olmasına göre değişir. Bu faktör de rüzgar enerjisinin şiddetini ve yönünü etkileyen önemli özelliklerden birisidir.

Rüzgarlar oluştukları yer ve etki altına aldığı bölgenin boyutlarına göre de değişik isimler alır.

Tropikal Kasırgalar : Okyanus bölgelerinde, okyanus suyu ısınır su buharı halinde hava kütlelerinin içine karışır. Bu kütlelerin atmosferin yüksek seviyelerine doğru yükselmesi ve soğuması sonucunda su molekülleri birleşip tekrar sıvı hale geçerler. Bu sırada ortaya çıkan enerji bu büyük hava kütlelerini hareketlendirir. 10 ila 30 kilometre çapında olan merkez kuşağı bulutsuz ve sakin bir hava görünümündedir.

Fırtınalar : Bunların enerjisi de, hava kütlelerinin içlerindeki su buharının atmosferin yüksek seviyelerinde sıkışıp enerji açığa çıkartarak sıvılaşması ile ortaya çıkar. Genellikle, yağmurla beraber kuvvetli rüzgarlar oluşur. Süresi 5 ila 30 dakika arasındadır. Hızının ani bir şekilde artması önemli bir karakteristiğidir.

Foehn Rüzgarı : Dağ yamaçlarının ön taraflarında ortaya çıkar. Hava dağ eğiminde yükselirken içindeki su buharı sıkışır ve yağış nedeniyle azalır. Hava kütlesi tepeye ulaştığında iyice hafiflemiş, alçalmış ve hızı artmıştır.

Bora : Havanın ılık bir bölgeden sıcak bir plato üzerine gelmesi sırasında ortaya çıkar.

Jet Etkisi : Bazen topoğrafik şartlar nedeniyle, hava akımı dar bir kesitten geçmek zorunda kalır. Bu nedenle de hızlanır. Buna Jet Etkisi denir.

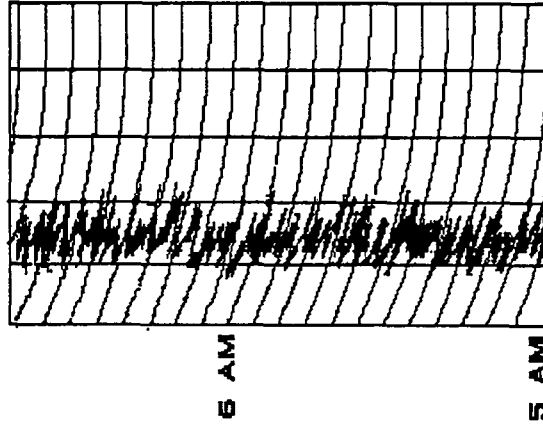
Hortumlar : Bütün rüzgarların en güçlüsüdür. Hortum havanın yaptığı büyük ölçekteki girdaba verilen isimdir. Tipik olarak 300 m. çapındadır. İçinde birçok fırtına gelişir ve 10 ila 30 m/sn hızla döner. Hortumun dolaştığı yol tipik olarak 15 km. civarındadır.

1.1.2. Mühendislik Meteorolojisi :

Meteorolojide bilgiler uzun süreli ölçümlere dayanır. Daha sonra, bunların istatistiksel metotlarla yorumlanması gerekir. Değişik özellikteki bölgelerde ve farklı yüksekliklerde yapılan rüzgar hızı ölçümleri sonucunda, rüzgarın bu parametrelere bağımlılığı konusunda birtakım bilgiler elde edilmiştir. Burada mühendislik meteorolojisi başlığı altında, elde edilen sonuçların rüzgar mühendisliğini ilgilendiren kısımları açıklanacaktır.

Meteorolojinin, yapı mühendisliğini ilgilendiren kısımları olarak, şu konular sayılabilir:

- Ortalama rüzgar hızının yerden itibaren değişimi
- Rüzgar hızı ile çeşitli çevre koşulları ve pürüzlülük arasındaki ilişki
- Ölçülen rüzgar hızı değerinin ortalama alınan zamana bağımlılığı
- Atmosferik türbülansın özellikleri, şiddeti ve türbülansa ait spektral yoğunluk fonksiyonu ile çapraz spektral yoğunluk fonksiyonudur.

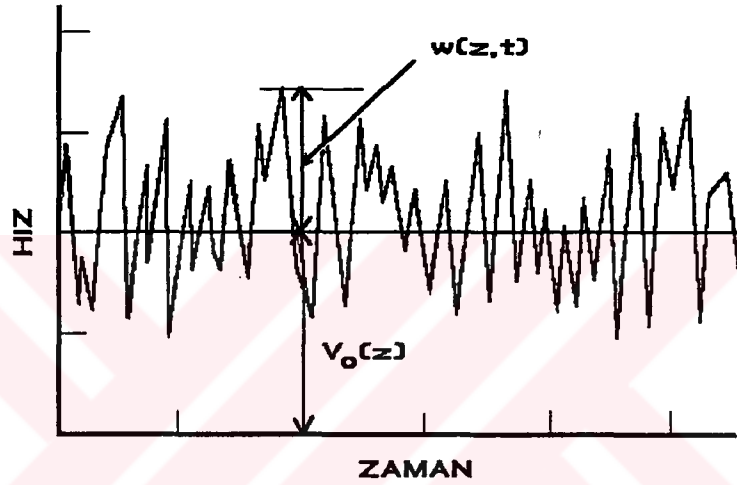


Şekil 1-1. Genel bir rüzgar kaydı.

1.1.2.1. Yeryüzeyinden İtibaren Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi

Değişik zaman ve yüksekliklerde yapılan rüzgar hızı ölçümlerinden elde edilen kayıtların genel karakteri Şekil 1-1 de görüldüğü gibidir. $V(z,t)$ şeklinde ifade edilen bu fonksiyon, $V_o(z)$ ve $w(z,t)$ gibi iki parçanın toplamı şeklinde yazılabilir.

$$V(z,t) = V_o(z) + w(z,t) \dots\dots\dots (1.1)$$

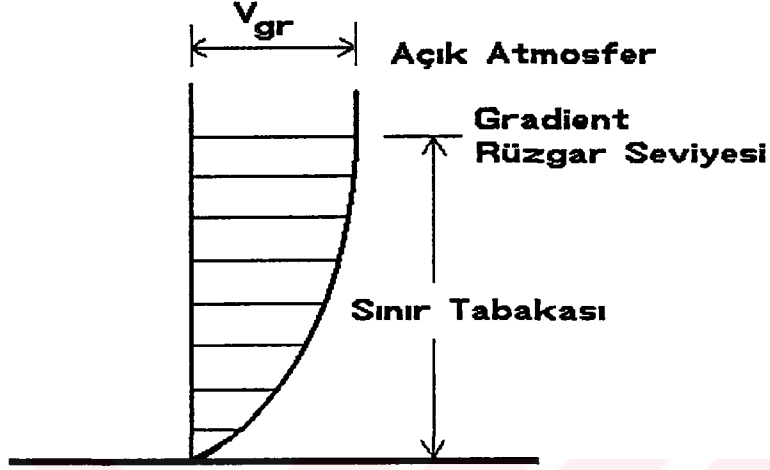


Şekil 1-2. Rüzgar hızının ortalama ve zamana bağlı olarak değişen parçaları.

Burada z , yerden itibaren yükseklik, t , zamanı göstermektedir. Bu iki fonksiyon, Şekil 1-2 de gösterilmiştir. Bunlardan $V_o(z)$ hızın ortalama parçası, $w(z,t)$ ise titreşen parçası olarak isimlendirilir. z yüksekliğine bağlı olarak $V_o(z)$ ın değişimine hız profili denir. Hız profili $z=0$ dan yani, yer düzleminden başlar ve yüzey sürtünmesinden etkilenmeyecek bir yere kadar artar. Bu sınır değerine gradient yükseklik, buradaki hız değerine de gradient hız denir (Şekil 1-3).

Çokça kullanılan iki tip rüzgar profili modeli vardır. Bunlardan birisi Davenport [1] tarafından önerilen kuvvet kuralıdır.

$$V_o(z) = V_o(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \dots\dots\dots (1.2)$$



Şekil 1-3. Yer yüzeyine yakın yerlerde rüzgar hız profili.

Burada $V_o(z_r)$, z_r referans yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızını ifade etmektedir. Referans yüksekliğinin standart değeri $z_r = 10$ m. dir. α değeri çevre pürüzlülüğüne bağlı bir değerdir. Bu değer değişik karakterdeki bölgeler için Tablo 1-1 de verilmiştir.

Tablo 1-1. Bölge sınıfına göre α değerinin değişimi

Bölgeler : I : Açık su yüzeyleri, II : Açık kara, III : Seyrek yapıdaki yerleşim yerleri, IV : Şehirler ve ormanlık bölgeler, V : Büyük şehir merkezleri

Bölge	I	II	III	IV	V
α	0.1	0.14	0.20	0.25	0.30

Diğer alternatif kural ise, Logaritmik Kural olarak bilinir. Simiu [2] tarafından verilen formül şu şekildedir:

$$V_o(z) = V_o(z_r) \frac{\ln \frac{z}{z_o}}{\ln \frac{z_r}{z_o}} \dots \dots \dots (1.3)$$

Burada z_o pürüzlülük uzunluğu olarak isimlendirilir ve değişik pürüzlülük yapısındaki bölgeler için Tablo 1-2 de verilmiştir.

Tablo 1-2. Bölge sınıfına göre z_o değerinin değişimi
Bölge sınıfları Tablo 1.1 deki gibidir.

Bölge	I	II	III	IV	V
z_o	0.005 - 0.01m	0.03 - 0.10m	0.20 - 0.30m	0.35 - 0.45m	0.60 - 0.80m

Gradyant yüksekliği z_G , yer sürtünmesi yüzünden ortalama rüzgar hızında oluşan düşmenin ihmal edilebilecek kadar azaldığı yerin yüksekliğidir.

$$z_G = 0.25 \frac{u_*}{f} \dots \dots \dots (1.4)$$

Burada f : Coriolis parametresi olup, yükseklikle değişimi Kaynak [3 sf: 13] de gösterilmiştir. u_* ise sürtünme hızı olarak isimlendirilir.

$$u_* = \frac{V(z_r)}{2.5 \ln \frac{z_r}{z_o}} \dots \dots \dots (1.5)$$

Bu z_G ile tanımlanan atmosferik seviye, atmosferik sınır tabakası olarak bilinir.

Kuvvet kuralı ve logaritmik kural aynı fiziksel olayın iki ayrı ifadesi gibi görünmekle beraber, aynı tip bölgeye ait rüzgar profilleri birbirine eşit çıkmamaktadır. Kuvvet kuralı Kanada Ulusal Yapı Standardında (NBC) [4] ve Amerikan Ulusal Standardında (ANSI A58.1) [5] kullanılmıştır. Fakat referans hızı olarak NBC de saatlik ortalama hız kullanılmış, ANSI de ise en hızlı rüzgarın hızı tercih

edilmiştir. Bu nedenle aynı eksponansiyel α değeri kullanılmış olmasına rağmen, rüzgar profilleri bir miktar farklıdır.

1.1.2.2. Farklı Pürüzlülükteki Bölgelerin Ortalama Rüzgar Hızına Etkisi.

Eğer belirli bir bölgedeki, örneğin havaalanı gibi hemen hemen açık bir ortamdaki z_o pürüzlülük uzunluğu biliniyorsa ve farklı bir bölgedeki değeri hesaplanmak istenirse aşağıdaki formül yazılabilir.

$$V_o(z) \approx V_o(z_r)_{ref} p^{\frac{\ln \frac{z}{z_o}}{\ln \frac{z_{ref}}{(z_o)_{ref}}}} \dots \dots \dots (1.6)$$

Burada; $V_o(z)$, z yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı (pürüzlülük uzunluğu z_o olan bölgede); $V_o(z_r)_{ref}$: Referans yüksekliğinde ve açık bölgedeki rüzgar hızı; $(z_o)_{ref}$, Açık bölgedeki pürüzlülük uzunluğu ve p : azalma faktörü olarak tanımlanır. p faktörü, z_o ve $(z_o)_{ref}$ in bir fonksiyonu olarak belirlenir. Gerçek yapılardan alınan ölçümler sayesinde aşağıdaki tablo hazırlanmıştır [6].

Tablo 1-3. Bölge sınıfına göre p değerinin değişimi

Bölge sınıfları Tablo 1-1 deki gibidir.

Bölge	I	II	III	IV	V
p	0.83	1.00	1.15	1.33	1.46

1.1.2.3. Bölgesel Rüzgarlar ve Fırtınalar İçindeki Rüzgar Hızı Profilleri

Tropik kasırgaların içindeki rüzgar profili, tropik olmayanlarınkine nazaran daha farklıdır. Bu farklılığın bir nedeni de, yüksek tropik rüzgar bölgesinde akım yolu eğriseldir. Bu eğrilik nedeniyle oluşan santrifüj kuvvetleri rüzgar profilini etkiler. Simiu' nun bir çalışmasında [7], bu kuvvetlerin etkisinin atmosferin 400m. sinden daha alt bölgelerde ihmal edilebileceği ve logaritmik kuralın buralarda da

kullanılabileceği gösterilmiştir. Ancak kasırgalar içindeki rüzgar profilini veren deneysel çalışmaların, henüz yeterli seviyede olduğu söylenemez.

Fırtınalar için ise, yapılan ölçümler sonucunda [8], yerden 91m yüksekliğe kadar rüzgar hızının değişiminin logaritmik kurala göre alınması teklif edilmektedir. Bu kottan daha yukarıdaki yüksekliklerde, değişim genellikle küçüktür.

1.1.2.4. Atmosferik Türbülans :

Rüzgar hızı Şekil 1-2 den de görüldüğü gibi, zamana bağlı olarak rastgele değişir. Bu değişimin nedeni, yapısı içinde oluşan türbülansdır. Atmosferik türbülansın ana özellikleri ile ilgili bilgiler, aşağıdaki nedenlerden dolayı yapı mühendisliği için önemlidir.

- i.) Hız çalkantıları fleksibıl yapılarda rezonansa yol açabilir.
- ii.) Rijit yapılar veya yapı parçaları zamana bağlı yüklere maruz kalmaktadır.
- iii.) Laboratuarda elde edilen test sonuçları, rüzgar akımının içindeki türbülansın önemli derecede etkilenmiş olabilir.
- iv.) Akım kararsızdır. Bu nedenle ölçülen rüzgar hızı, ortalama alınan zamana bağlıdır. Bir bölge için en yüksek rüzgar hızının belirlenmesi istendiğinde; yapılan ölçümlerin saatlik, günlük, aylık veya yıllık değerlendirme sonuçları genellikle farklıdır.

1.1.2.4.1. Türbülans Yoğunluğu :

Türbülans yoğunluğu, yerden belli bir yükseklikte ortalama rüzgar hızı ile, hız çalkantılarının kareleri ortalamasının arasındaki oran olarak tanımlanmıştır. Bir hava akımı içindeki mevcut türbülansın seviyesini belirlemek için kullanılır.

$$I(z) = \frac{\overline{w(z,t)^2}(z)}{V_o(z)} \dots\dots\dots (1.7)$$

Burada ; $w(z,t)$, $V_o(z)$ ortalama rüzgar hızı etrafında boyuna hız çalkantılarıdır. Bu çalkantıların karelerinin ortalaması için, yapıların boyutlandırılmasında kullanılmak amacıyla amprik bir formül önerilmektedir [6].

$$\overline{w(z,t)^2} = \beta u_*^2 \dots\dots\dots (1.8)$$

Burada β katsayısının değeri, Tablo 1-1 de tanımlanan bölgelere göre, aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 1.4. Bölge sınıfına göre β değerinin değişimi

Bölge	I	II	III	IV	V
β	6.00	6.00	5.25	4.85	4.00

1.1.2.4.2. Türbülansın Spektral Yoğunluk Fonksiyonu :

Rüzgar hızının rastgele çalkantı halindeki parçası olan $w(z,t)$, çok sayıdaki düzenli titreşimin süperpozisyonu olarak ifade edilebilir. Belli bir noktada hava akımının çalkantısını oluşturan frekansların toplu halde gösterimine, spektral gösterim adı verilir.

İçindeki, üstel şekilde artım gösteren ortalama parçası çıkartılmış olan rüzgar hızı fonksiyonu, sıfır ortalamalı ve normal dağılımlı bir rastgele fonksiyon olarak ifade edilebilir. Teklif edilen iki farklı rüzgar spektral yoğunluk fonksiyonu şekli vardır. Bunlardan daha önce teklif edileni Davenport' a aittir [1].

$$X = 1200 \frac{f}{V_o(10)}$$

olmak üzere,

$$S_w(f) = 4K \cdot \frac{V_o^2(10)}{f} \cdot \frac{X^2}{(1+X^2)^{4/3}} \dots \dots \dots (1.9)$$

şeklindedir. Burada $V_o(10)$, 10 m. referans yüksekliğindeki m/sn cinsinden ortalama rüzgar hızı, f frekans (Hz) ve K yüzey itki katsayısıdır. K değeri açık bölgeler için 0.005 den, şehir merkezleri için 0.05 arasında değişim gösterir. Davenport'a ait spektral yoğunluk fonksiyonunun şekli yükseklikten bağımsızdır ve 600 m. dalga boyunda bir tepe noktası vardır. (Yani $V_o/f = 600$ olduğu yerde.) Bu fonksiyon, birçok ülkenin standartlarında kullanılmıştır.

Türbülansa ait spektral yoğunluk fonksiyonu olarak diğer bir model, Simiu tarafından önerilmiştir [9]. Bu fonksiyonun şekli ise diğerinin aksine yüksekle değişir.

$$N = \frac{fz}{V_o(z)}$$

olmak üzere

$$S_w(z,f) = \frac{u_*^2}{f} \cdot \frac{200N}{(1+50N)^{5/3}} \dots \dots \dots (1.10)$$

olarak verilmiştir. Burada u_* , sürtünme hızıdır ve (1.5) denklemiyle nasıl hesaplanacağı verilmiştir. N ifadesindeki z parametresi sayesinde, bu ifade yüksekliğe bağımlı hale gelmektedir.

Rastgele fonksiyonlar teorisine göre sıfırdan sonsuza kadar spektral yoğunluk değerlerinin toplanması, o noktadaki titreşen rüzgar hızının karelerinin ortalamasını verir. Bu değer önemli bir istatistiksel parametredir ve RMS (root-mean-square) değeri olarak da bilinir.

$$\sigma_w^2(z) = \overline{w(z,t)^2} = \int_{f=0}^{\infty} S_w(z,f) df \dots \dots \dots (1.11)$$

Burada $w(z,t)$ titreşen rüzgar hızı; S_w hız titreşimlerinin spektral yoğunluğu; f ise frekans olarak kullanılmıştır. Frekans değerleri yükseldikçe spektral yoğunluk fonksiyonunun eğrisinin ordinatları yani, o frekansın katkısı düşer. Bu nedenle

doğal frekansı yüksek olan yapılarda zamana bağlı rüzgar hızının etkisinin daha az olduğu söylenebilir.

1.1.2.4.3. Türbülansa Ait Çapraz Spektral Yoğunluk Fonksiyonu:

Bir noktadaki hız titreşimlerine katkıda bulunan frekansların yanında, ayrıca bu harmonik frekansların iki nokta arasındaki ilişki derecesi de önemlidir. Bu bilgi, sözkonusu iki nokta arasındaki çapraz spektral yoğunluk olarak isimlendirilir. Bu ilişkinin iki nokta arasındaki mesafe arttıkça azalacağı açıktır. Bu azalma ayrıca yüksek frekanslarda daha hızlıdır. Aşağıda bu davranışı tanımlamak için kullanılan bir formül verilmiştir [10].

$$S_w(N_1, N_2, f) = S_w^{1/2}(N_1, f) S_w^{1/2}(N_2, f) e^{-n} \dots \dots \dots (1.12)$$

Burada $S_w(N_1, N_2, f)$, N_1 ve N_2 noktalarına etkiyen zamana bağlı rüzgar hızının çapraz spektral yoğunluk fonksiyonudur. e^{-n} ise iki noktanın birbirine bağımlılığını gösteren ifadedir ve Koherins (Coherence) fonksiyonu olarak bilinir. Buradaki n değeri için kullanılan formüllerden birisi, şu şekildedir.

$$n = \frac{f[C_z(z_1 - z_2)^2 + C_y(y_1 - y_2)^2]^{1/2}}{V_o(10)} \dots \dots \dots (1.13)$$

Bu denklemdaki z_1, z_2, y_1, y_2 değerleri, N_1 ve N_2 noktalarının koordinatlarıdır. $[N_1, N_2]$ doğrusu ana rüzgar yönüne dik durumda olmalıdır. $V_o(10)$, yerden 10 m. yükseklikteki ortalama rüzgar hızıdır. Üstel azalma katsayıları, deneysel olarak belirlenmiş ve Kaynak [10] de $C_z = 6$ ve $C_y = 9$ olarak verilmiştir.

Bir alternatif n formülü de Vickery [11] tarafından önerilmektedir.

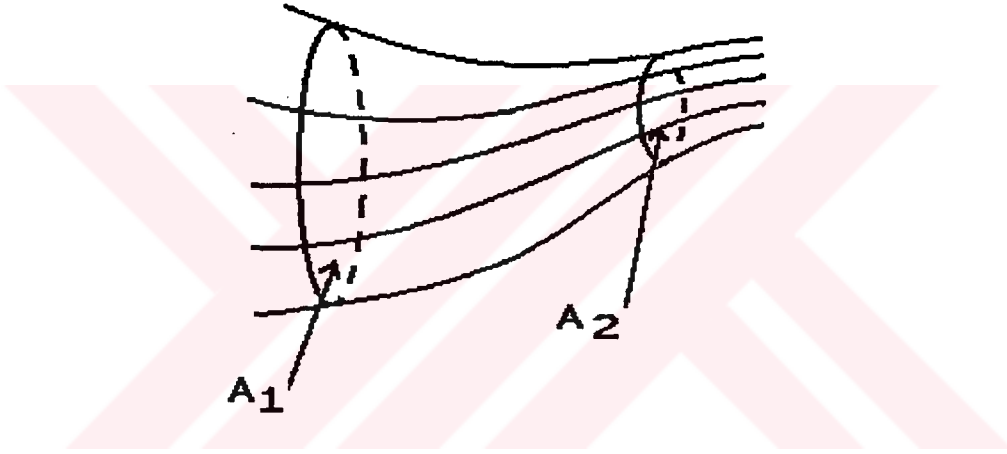
$$n = \frac{2f[C_z(z_1 - z_2)^2 + C_y(y_1 - y_2)^2]^{1/2}}{V_o(z_1) + V_o(z_2)} \dots \dots \dots (1.14)$$

Vickery, rüzgar tuneli testlerine dayanarak $C_z = 10$ ve $C_y = 16$ değerlerini vermektedir.

1.2. RÜZGARIN YAPILARA ETKİSİ

1.2.1. Aerodinamik

Aerodinamik, hareket eden havanın cisimler üzerinde oluşturduğu kuvvetleri inceler. Atmosferik akımlar, yapılar üzerinde zamanla değişen aerodinamik kuvvetler oluşturur. Eğer zamanla değişen bu kuvvetleri oluşturan etkin harmonik frekanslar yapının doğal frekanslarından biri veya birkaçına eşit veya yakın olursa, rezonans olayı gerçekleşir. Bu durum, yapının aşırı deplasmanlar yapmasına yol açıp, mukavemet ve servis verebilirlik özelliklerini tehlikeye düşürür.

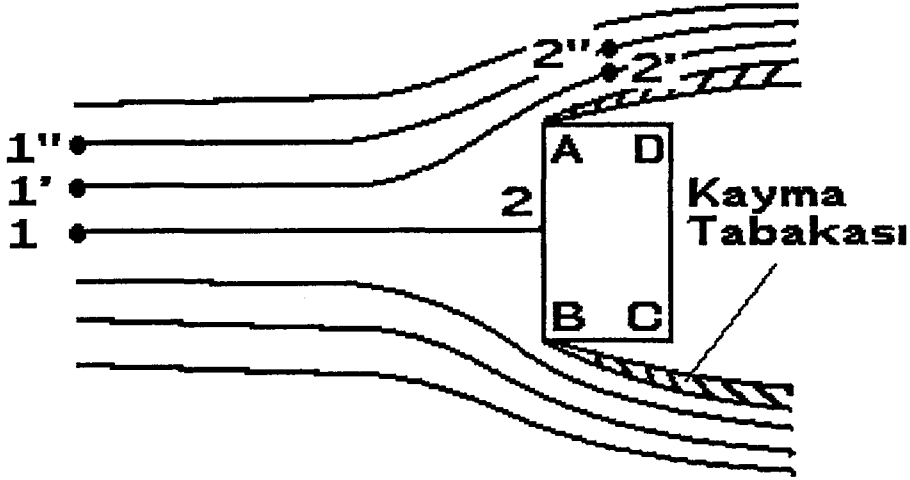


Şekil 1-4. Farklı boyuttaki iki alan arasındaki hava akım çizgileri.

1.2.1.1. Temel Prensipler ve ilişkiler

1.2.1.1.1. Kütlelerin Korunumu Kanunu

Bu prensibe göre, belli bir hacme bir zaman dilimi içinde giren ve çıkan akışkan kütleleri, birbirine eşittir. Bu prensip nedeniyle, daha dar bir alandan geçmek zorunda kalan hava akımı hızlanır. Şekil 1-4 de görünen A1 ve A2 alanlarından birim zamanda geçen hava kütleleri, eşittir. Bu nedenle de A2 alanı içinde gözlenen rüzgar hızı, A1 alanındakine oranla daha fazladır. Aynı şekilde, Şekil 1-5 deki 1'-2' ve 1"-2" akım çizgileri boyunca, 2' ve 2" noktaları 1' ve 1" noktalarından daha hızlıdır.



Şekil 1-5. Dikdörtgen şeklindeki bir yapı etrafında akım çizgileri.

1.2.1.1.2. Bernoulli Denklemi

Newton' un ikinci kanununa göre, rüzgar akımı içindeki hava paçacıkları ivmeleri ve atalet kütleleri nedeniyle belirli bir kuvvete maruzdurlar. Akışkan içerisindeki bu kuvvetler normal basınçlar ve kayma gerilmeleri sayesinde dengelenirler. Kayma gerilmelerinin ihmal edildiği düzenli bir akım içinde, aşağıdaki ilişki yazılabilir.

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p = \text{sabit} \dots\dots\dots (1.15)$$

Burada ρ hava yoğunluğu; V hız; p ise basınçtır.

1.2.1.1.3. Dinamik Basınç

$q = \frac{1}{2}\rho V^2$ değeri, dinamik basınç olarak bilinir. 15°C ısısında ve 760 mm cıva basıncındaki standart hava, 12.00717 N/m³ yoğunluğundadır. Rüzgar hızı V m/sn cinsinden ifade edilirse, dinamik basınç olarak,

$$q = 0.612 V^2 \dots \dots \dots (1.16)$$

elde edilir.

1.2.1.1.4. Reynolds Sayısı

Akışkan akımının karakteri, içinde oluşan atalet kuvvetleri ile viskozite kuvvetleri arasındaki orana bağlıdır. Bu oranın bir ölçüsü, boyutsuz bir sayı olan Reynolds sayısıdır.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \dots \dots \dots (1.17)$$

Burada V karakteristik hız, D karakteristik yapı boyutu, ν kinematik viskozitedir. $\nu = \mu/\rho$ olarak tanımlanır. Burada da μ havanın viskozitesi ve ρ yoğunluğudur. 15°C'daki hava için $\nu = 1.5 \times 10^{-5} m^2/sn$ olduğuna göre,

$$Re \approx 67,000VD \dots \dots \dots (1.18)$$

olarak yazılabilir ki, burada V ve D sırasıyla m/sn ve m olarak yerine konmalıdır.

1.2.1.2. Katı Cisimlerin Çevresinde Hava Akımının Davranışı

1.2.1.2.1. Basınç ve Emme Bölgeleri

Üniform bir hava akımı, keskin kenarlı katı bir cismin etrafında Şekil 1-5'deki gibi bozulur. Rüzgarın geldiği yüzeyin A ve B köşelerinde akım cisimden ayrılır. 1 noktasından gelen hava kütlesi, 2 noktasına ulaştığında hızı sıfırlanır. Bu nokta, durgun nokta olarak isimlendirilir. Bu noktadaki basınç, Bernoulli denklemi sayesinde hesaplanabilir.

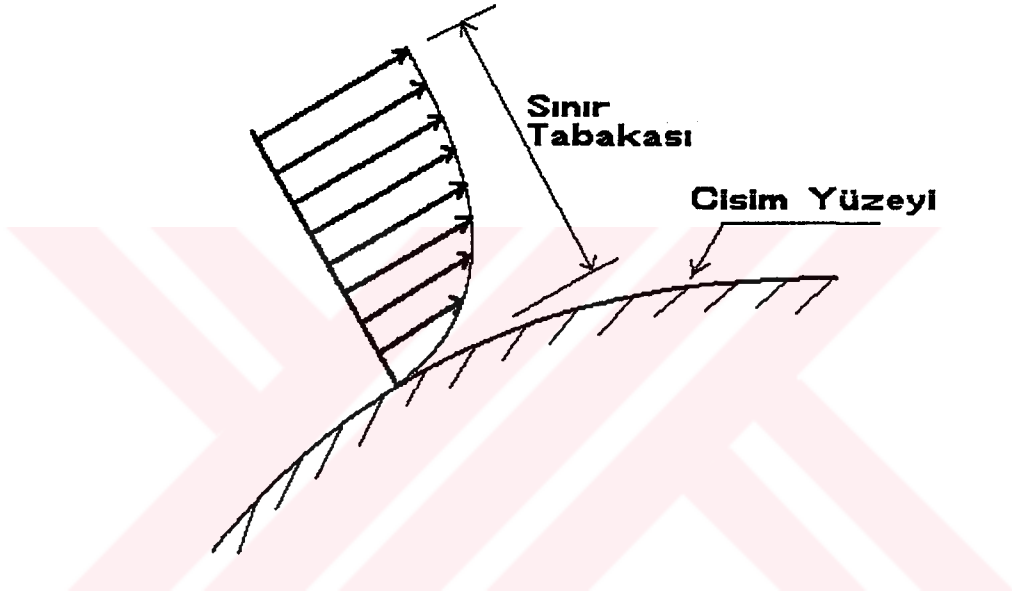
$$p_2 = \frac{1}{2} \rho V_1^2 + p_1 \dots \dots \dots (1.19)$$

1 noktasındaki akım hızı V_1 , rüzgarın cisimden sonsuz uzaklıktaki hızına eşit kabul edilirse, basıncı p_1 , atmosferik basınç p_a ya eşit olur. Hızın sıfır olduğu 2 noktasındaki basınç değeri, (1.19) denklemi nedeniyle p_a dan daha yüksektir.

Şimdi, (1.15) denkleminde, 1'-2' akım çizgisi üzerindeki basıncı yazalım.

$$\frac{1}{2}\rho V_2'^2 + p_2' = \frac{1}{2}\rho V_1'^2 + p_a \dots\dots\dots (1.20)$$

$V_2' > V_1'$ olduğundan $p_2' - p_a < 0$ olur. Bu da, 2' noktasındaki basınç atmosferik basınçtan düşük demektir. Atmosferik basınçtan düşük bölgelere, negatif basınçlı bölgeler denir. Şekildeki AD, BC ve arka taraftaki CD bölgesi, bu karakterdedir.

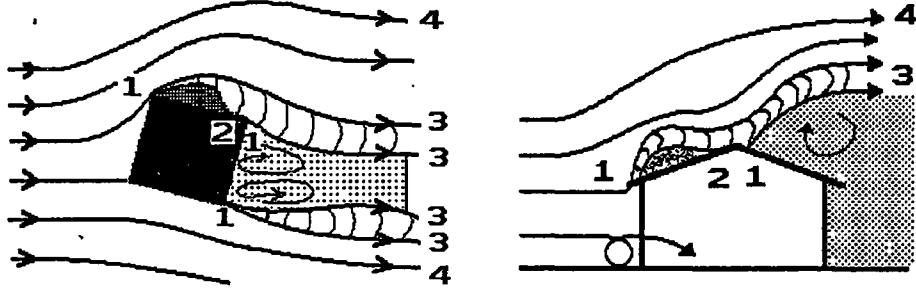


Şekil 1-6. Rijit bir cismin yakınında oluşan sınır tabakası.

1.2.1.2.2. Akım Ayrılma Mekanizması

Bir hava akımı sırasında, cisme temas eden hava, yüzeye yapışır. Hava hareketinin hızının kısıtlandığı, cisme yakın, ince bir film halindeki bu bölgeye sınır tabakası denir (Şekil 1-6). Bu sınır tabakasında ortalama rüzgar hızı, sıfırdan tam değeri olan u ya kadar değişiklik gösterir. Negatif basınç dağılımının kuvvetli olduğu bölgelerde, akım sınır tabakasından ayrılır. Bu ayrılmalar, Şekil 1-7a,b deki gibi keskin kenarlı cisimlerin köşelerinden başlar. Bu bölgelerde, büyük negatif basınç gerilmeleri vardır. Planda eğrisel şekilli cisimlerde, ayrılma noktasının yeri, cismin şekline ve sınır bölgesindeki akımın yapısına bağlıdır. Eğer sınır tabakası laminer yapıdaysa, ayrılma daha erken yani, durgun noktaya yakın olarak gerçekleşir. Eğer türbülanslı yapıdaysa, durgun noktadan uzakta arkaya doğru bir yerde

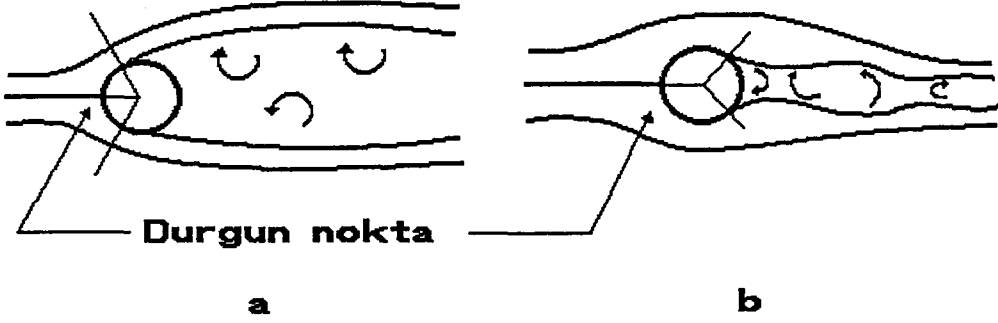
ayrılma olur. Şekil 1-8 de, dairesel enkesitte sahip bir cismin etrafındaki akım ayrılma mekanizması, laminar ve türbülanslı akım halinde ayrı, ayrı gösterilmiştir.



- 1 Ayrılma noktaları
- 2 Tekrar birleşme noktaları
- 3 Ayrılma çizgileri
- 4 Akım çizgileri
- 5 Ayrılmış akım
- 6 Arka taraf akımları
- 7 Kayma tabakası

Şekil 1-7. Keskin kenarlı yapılar etrafındaki hava akım çizgileri.

Bu durum, şöyle izah edilebilir. Ayrılmanın daha ilerde gerçekleşmesi demek, akıma yapılan engellemenin daha zayıf olması ve akışkan parçacıklarının daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmaları demektir. Türbülanslı akımın bir sonucu olarak, akışkan parçacıkları sınır tabakası içerisinde rastgele dolaşırlar. Bu nedenle, negatif basınç etkisini zayıflatma kabiliyetleri, laminar akımlarinkine göre daha fazladır. Bu nedenle türbülanslı akımlarda ayrılma daha geç olur.

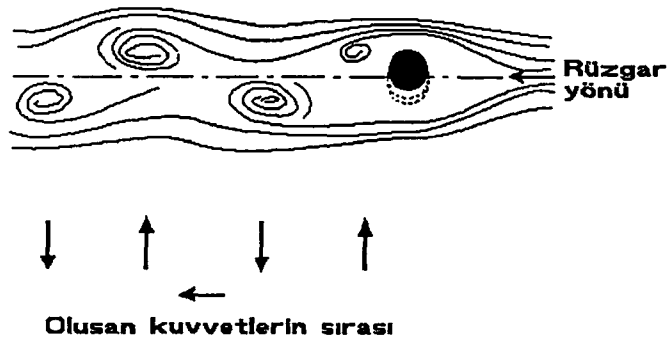


Şekil 1-8. Silindirik bir cismin üzerindeki ayrılma noktaları

- a.) Sınır tabakası laminar karakterdeyse,
- b.) Sınır tabakası türbülanslı ise,

1.2.1.2.3. Arka Tarafta Kalan Akımlar.

Ayrılmış bölgelerin çevresinde, içinde kuvvetli kayma gerilmeleri olan rotasyonel şekilde ilerleyen akımlar oluşur. Bu akımlar, ayrılmış bölgelerin içinde vorteksler oluşturur. Bu vorteksler, ayrıca cismin arka tarafında da oluşur. Bu vortekslerin oluşma mekanizmaları, tam olarak belirlenmiş değildir. Arka tarafta oluşan vorteksler, daha iyi organize olmuş ve daha düzenli şekildedirler. Bir yol görünümündeki bu bölgeye, Von Karman vorteks yolu adı verilmiştir. Şekil 1-9 da cismin arkasında oluşan düzenli vorteks yapısı görülmektedir.



Şekil 1-9. Şematik vorteks yolu

1.2.1.2.4. Strouhal Sayısı

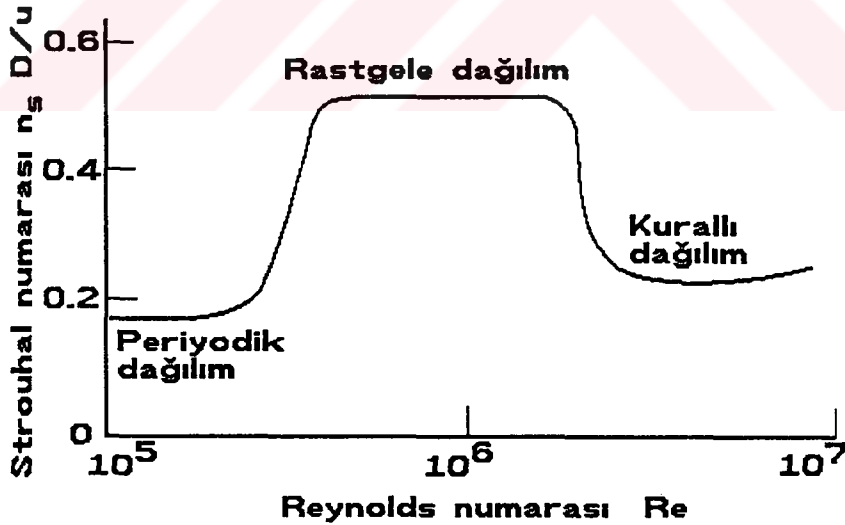
Silindirik bir cismin arkasında oluşan vortekslerin frekansı, şu formülle hesaplanabilir.

$$S = \frac{n_s D}{V} \dots \dots \dots (1.21)$$

Burada S Strouhal sayısı, D tipik kesit boyutu, n_s vortekslerin frekansıdır. Bu frekans, Strouhal frekansı olarak da bilinir.

Strouhal sayısı, silindirik cismin enkesiti, Reynolds sayısı, türbülans karakteristikleri ve çevre yüzeyinin pürüzlülük özelliklerine bağlıdır. Düzgün yüzeyli uzun dairesel silindirlerin üniform akım içindeki Strouhal sayıları ve Reynolds sayıları arasındaki ilişki $Re > 10^5$ değerleri için Şekil 1-10 de gösterilmiştir.

Keskin köşeli prizmatik şekiller için, henüz yeterince çalışma yoktur. Ancak yapılan çalışmaların gösterdiği kadarıyla, bu tip cisimler için vorteks dağılımı Reynolds sayısından bağımsızdır.



Şekil 1-10. Silindirik bir cismin etrafındaki akımlarda, Reynolds sayısına bağlı olarak Strouhal sayısının ve cismin arka tarafında oluşan vortekslerin dağılımının değişimi.

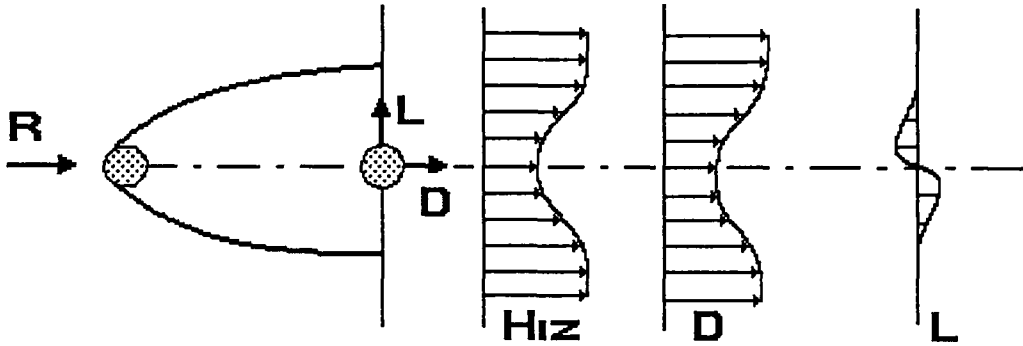
1.2.1.3. Rüzgarın Yapı Üzerinde Oluşturduğu Kuvvetler.

Hareket eden hava akımının etkisindeki bir cismin her bir noktasına etkiyen basınç değeri, bir referans noktasındaki basınç değerinin sabit bir katsayı ile çarpımı olarak ifade edilebilir. Bu boyutsuz basınç katsayıları şu şekilde tanımlanır.

$$C_p = \frac{p - p_o}{q} \dots \dots \dots (1.22)$$

Burada $q = \frac{1}{2} \rho V^2$ referans noktasındaki dinamik basınç, ρ havanın yoğunluğu, V ortalama rüzgar hızı, p bölgesel basınç, p_o cismin rüzgar tarafında olmakla beraber uzağındaki basınç değeridir.

Bir cisme etkiyen aerodinamik kuvvetler, genellikle iki bölüm halinde incelenir. Bunlardan birincisi rüzgarın esiş yönünde, diğeri ise buna dik yönde cisme etkiyen kuvvetlerdir. Şekil 1-11 de, hava akımı içindeki silindirik bir cismin üzerinde oluşan bu tür kuvvetler gösterilmiştir. Bu kuvvetlerle ilgili boyutsuz C katsayıları aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 1-11. Rüzgar etkisindeki bir cisme rüzgarın esiş yönünde ve ona dik yönde etkiyen kuvvetler.

$$C_D = \frac{D}{qA} \dots\dots\dots (1.23a)$$

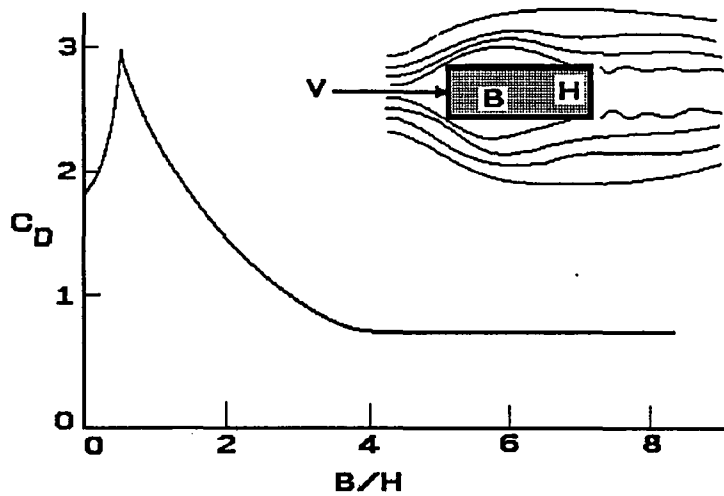
$$C_L = \frac{L}{qA} \dots\dots\dots (1.23b)$$

$$C_M = \frac{M}{qAB} \dots\dots\dots (1.23c)$$

Burada D Rüzgar yönünde oluşan itki kuvveti, L rüzgara dik yönde oluşan kuvvet, M aerodinamik moment, A ve B yapı üzerindeki rüzgara maruz alanları göstermektedir.

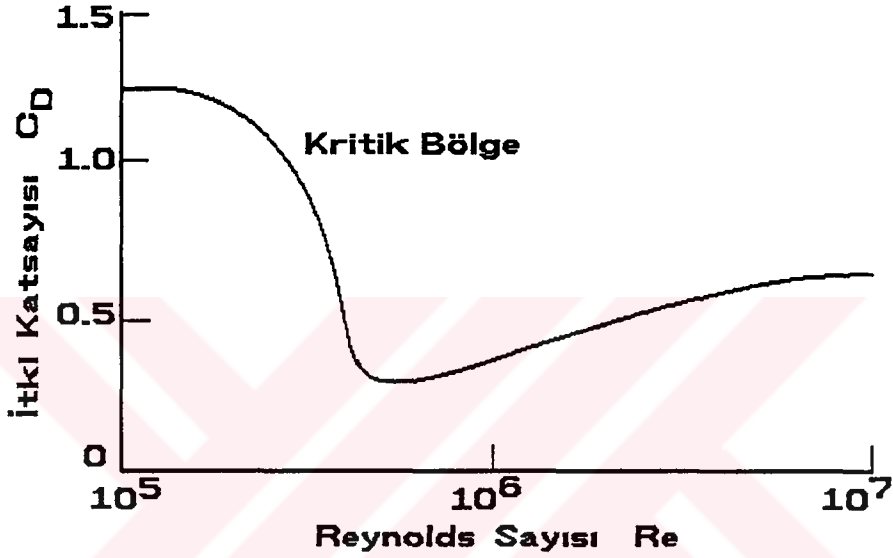
Bu kuvvetler ve bunların boyutsuz katsayıları, deneysel olarak tespit edilmektedir. Eğer aerodinamik kuvvetler zamanla değişiyorsa bu değerler de zamana bağlı ifadeler haline gelecektir. Bu durumda, bunların ortalama değer, maximum değer, kareleri ortalamasının karekökü (RMS), ihtimaller dağılımı ve spektral yoğunluk (PSDF) gibi istatistiksel karakteristikleri kullanılmaktadır.

Boyuna yöndeki itki kuvvetleri, dikdörtgen enkesitli cisimlerde yükseklik ve enkesitin genişliği arasındaki orana bağlı olduğu gibi, hava akımının Reynolds sayısına da bağlıdır. Şekil 1-12 bu katsayının, yapının B/H oranına, Şekil 1-13 ise akımın Reynolds sayısına bağlı olarak değişimini göstermektedir.



Şekil 1-12. Dikdörtgen şeklindeki cisimlerin üzerine, rüzgarın esiş yöninde etkiyen kuvvetlerin B/H oranına bağımlılığı.

Basınç dağılımı ile itki kuvvetinin Reynolds sayısına üzerine bağımlılığı silindirik yüzeyinin pürüzlü veya düz olmasına göre değişir. Gerçekten pürüzlülük veya çıkıntılar sınır tabakasının türbülanslı olmasını sağlar. Bu da arka taraftaki akımın karakterini değiştirir. Gözlenmiştir ki, bu şekilde yüzeye çıkıntılar ilave ederek pürüzlendirilmiş cisimlerde, itki kuvveti belirli Reynolds sayısı sınırları içinde azalmaktadır. Bu prensipten, golf toplarından, hiperbolik soğutma kulelerinin dizaynına kadar, değişik yerlerde yararlanılmaktadır.



Şekil 1-13. Hava akımı içindeki silindirik cisimlerin üzerine etkiyen, akım yönündeki kuvvetin Reynolds sayısına bağımlılığı.

1.2.2. Aeroelastisitenin Temel Kavramları

Eğer bir yapı pratik olarak rijit tasarlanmışsa, akışkanın hareketi sırasında, sadece akışkanın kendisinin hareket ettiği, yapının sabit kaldığı düşünülebilir. Aksi halde, yani yapı fleksibil ise, yapı da akışkana göre rölatif olarak hareket eder. Bu hareket akımın karakterini, yapıyı daha kötü etkileyecek şekilde değişmeye zorlarsa, bu pozitif geri besleme mekanizması yüzünden yapının davranışında bir stabilite bozukluğu problemi ortaya çıkar. Bu olaya aerodinamik instabilite denir. Yapının akışkanla beraber hareketini ve bu geri besleme mekanizmasını inceleyen çalışmalar da aeroelastisite olarak isimlendirilir. Aerodinamik kuvvetler yapının hareketinden etkileniyorsa, bu tip kuvvetlere kendi kendini zorlayan kuvvetler denir. Mühendislik uygulamalarında ortaya çıkan aeroelastik problemler şunlardır.

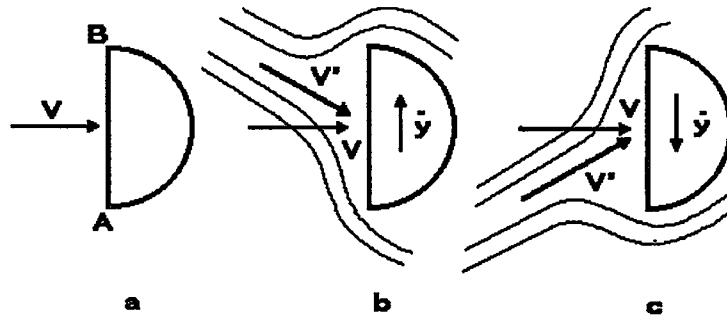
1.2.2.1. Rezonans (Lock-In) Etkisi

Hava akımı içinde kalmış silindirik bir cismin, arka tarafında Strouhal frekansına eşit frekansta vorteksler oluşmaya başlar. Eğer silindir elastik yapıdaysa ve Strouhal frekansı cismin doğal frekansından uzaktaysa, silindirin rüzgarın esiş yönüne dik titreşimleri küçüktür ve vortekslerin frekansından etkilenmez.

Rüzgarın hızı $V_1 = n_1 D/s$ değerine ulaşırsa, rezonans durumu ortaya çıkar. Titreşimlerin genliği artmaya başlar. Burada n_1 ve D sırasıyla cismin doğal frekansı ve çapıdır. S ise Strouhal sayısıdır. Bu durumda, yapının titreşimleri arka tarafta oluşan vortekslerin frekansını kontrol etmeye başlar. Bu aeroelastik akım-cisim ilişkisi Rezonans (Lock-in) Etkisi olarak bilinir.

1.2.2.2. Galloping

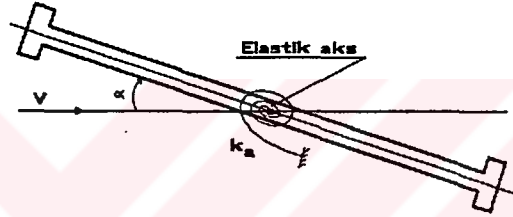
Bu olay, D şeklindeki kesitlerde daha belirgin şekilde ortaya çıkar. Şekil 1-14 de gösterilen D şeklindeki bir kesite, AB yüzeyine dik bir hava akımı geldiğinde eğer yapı herhangi bir nedenle bu etkiye dik yönde bir $\dot{y}$ hızı kazanırsa, hava akımının bu kesite göre hızı $\dot{y}$ ve V hızlarının bileşkesi olan V' dır. Bu durumda akımın simetrisi bozulur. Bunun sonucunda A ve B noktaları civarındaki rüzgar hızı ve dolayısı ile basıncı artık eşit değildir. Sonuç olarak, cisme y doğrultusunda etkiyen bir kuvvet ortaya çıkar. Bu kuvvet cismi y doğrultusundaki hareketinin ters yönünde zorlar. Hareketin tersine dönmesi halinde, etkiyen rüzgara dik yöndeki kuvvet de yön değiştirir. Bu durum da hareketin gittikçe kuvvetlenerek sürmesine neden olur.



Şekil 1-14. "D" Şeklinde enkesite sahip cisimlerde oluşan "galloping" etkisi.

1.2.2.3. Burulma İnstabilitesi

Şekil 1-15 deki gibi bir kesite, rüzgarın α açısıyla geldiğini düşünelim. k_α burulma yay sabiti olsun. Kesitin alt tarafına çarpan hava parçacıkları kesitte bir dönmeye neden olacaklardır. Bu dönme sonucunda α açısı büyüyecek, bu da daha fazla hava parçacığının alt yüzeye çarpması ve döndürme momentini arttırması sonucunu doğuracaktır. Bu olay kolonlardaki P- Δ etkisine benzer. Öyle bir V - α değeri vardır ki, V rüzgar hızının veya α kesit açısının bu değerlerden büyük olması halinde, α açısındaki ilave dönme k_α burulma yay sabitince kontrol edilemez hale gelir.



Şekil 1-15. Burulma instabilitesine maruz yapı tipi.

1.2.2.4. Çırpınma (Flutter)

Daha çok köprü tabliyelerinde ortaya çıkan bir aerodinamik instabilite olayıdır. Burulma ve ötelenme tipindeki titreşimlerin birbirini beslemesi şeklinde gelişir. Bu hareketin frekansı, köprü tabliyesinin düşey ve burulma deformasyonlarına ait doğal frekansları arasında bulunur. Rüzgar hızının artmasıyla, bir kritik hıza erişilir. Flutter (çırpınma) olayının başlamasından sonra, hareketin birkaç çevrimi içerisinde genlik aşırı derecede büyür.

Takoma Narows köprüsü, iki saat süresince 38 mph lık bir rüzgara maruz kalmıştı. Bu sırada yaklaşık 39 ft. uzunluğunda Karman vorteksleri oluştu. Fakat rüzgarın 42 mph hızına çıkmasından sonra kısa bir süre içinde burulma açısı iki tarafa doğru 45° ye kadar artmış ve köprünün yıkılmasına neden olmuştur.

1.3. RÜZGAR TUNELİ TESTLERİ

Analitik çözümü mevcut olmayan veya çok karmaşık olan problemlerde rüzgar tuneli testleri, aerodinamik karakteristiklerin ve yapı stabilitesinin tespit edilmesinde kullanılan ve sıkça başvurulmuş bir metottur. Tam boyutta, yani gerçek yapılar üzerindeki ölçümler, sadece tunel testlerinde tam benzeştirilemeyen problemleri çözmek veya birtakım ölçekleme hataları nedeniyle güvenilir olmayan tunel testi sonuçlarını kontrol etmek amacıyla yapılır. Genel anlamda iki tip rüzgar tuneli testi mevcuttur. Bunlardan birincisi durgun kesit model testi diğeri ise atmosferik sınır değerlerin tam olarak modellendiği tam model testidir.

1.3.1. Model Tipleri

1.3.1.1. Model Kesit Testi

Model kesit testinde, sadece yapının özelliklerini en iyi temsil eden bir bölümü test edilir. Modelleme ölçeği 1:30 ile 1:50 sınırları arasında tercih edilir. Modelleme masrafı tam model metoduna göre daha düşüktür. Gerçek yapının kütle, atalet momenti ve frekansı arasındaki ilişkiyi sağlayacak şekilde uygun olarak ölçeklendirilip, seçilen yaylarla, model kesit rüzgar tuneline yerleştirilir.

Bu testte, yapının seçilmiş olan parçası değişik rüzgar hızı ve açılarında test edilir. Reaksiyon kuvvetleri hava akımı yönünde, akıma dik yönde ve moment olarak ölçülür.

Bu tip testlerde, türbülanslı akımı benzeştirebilecek bir teknik henüz geliştirilememiştir. Normal olarak yapılan iş, kesiti düzenli akım altında test etmektir. Bu durum türbülanslı akım kullanarak testi gerçekleştirmekten daha gayrimüsaittir. Bu kabulün temeli ise türbülanslı akımın, yapının vorteks etkisine hassasiyetini azaltması ve kritik çırpınma hızını yükseltmesidir.

1.3.1.2. Tam Model Testi

Bu testlerde, yapının 1:200 veya daha küçük oranlarda küçültülmüş bir maketi kullanılır. Küçültme oranı arttıkça, bütün parametrelerin aynı oranda değiştirilememesinden kaynaklanan hatalar artar. Bu hataların artması, küçültme oranını sınırlar. Modeller genellikle rijit olarak hazırlanır. Köprü tipi yapılarda

alan, atalet momenti gibi yapının kesit karakteristikleri de uygun oranda küçültülerek modele ilave edilir. Ancak yüksek yapılarda, aeroelastik davranışının önemli olduğu yerlerde, yapının elastik karakterini modele belirli bir oranda yansıtmak için sadece temel hizasına bir yay konarak yapının eğilme karakteri tanımlanmaya çalışılır. Bu tip testlerde, genellikle yapının belli bir miktardaki çevresi de modellenerek teste katılır.

Yapıya gelen aerodinamik etkiler, rüzgarın farklı yönlerden gelmesi halinde önemli derecede fark gösterir. Çevre pürüzlülüğü akımın karakterini tamamiyle etkilediğinden, hava kayıtlarının alındığı yerdeki ve yapının bulunduğu yerdeki çevre pürüzlülüğünden tunelin içindeki modelin çevresindeki pürüzlülüğe geçmek, hassas bir çalışma gerektirmektedir.

Davenport, Halifax, Kanada' daki The Narrows köprüsü üzerinde yapılan çalışmalarda kesit model testlerinin yapının toplam stabilitesini belirlemekte yetersiz olduğunu göstermiştir. Bununla beraber bu tip testler, parça, parça montaj durumunda yapının genel stabilitesini hesaplamakta faydalı olabilir.

1.3.2. Model - Prototip Benzeştirme Tipleri

1.3.2.1. Geometrik Benzeşim

Bütün boyutlar, belirli karakteristik uzunluklara oranlanarak boyutsuzlaştırılır.

1.3.2.2. Kinematik Benzeşim

Bu tip benzerliği sağlayabilmek için, zaman boyutsuz hale getirilir.

$$\tau = \frac{tV}{D} \dots \dots \dots (1.24)$$

Burada τ boyutsuz karakteristik zamanı, t gercek zamanı, V rüzgar hızını, D karakteristik cisim boyutunu göstermektedir.

1.3.2.3. Dinamik Benzeşim

Prototip yapıyla, model arasında birçok boyutsuz parametrenin eşit olması sağlanır. Bu parametreler arasında şunlar sayılabilir.

$$\frac{V}{N_y D}, \frac{V}{N_\theta D} \dots \dots \dots (1.25)$$

Burada N_y ve N_θ sırasıyla yapının yatay ve burulma yönünde doğal frekanslarıdır.

$$\frac{m}{\rho D^2}, \frac{J}{\rho D^4} \dots \dots \dots (1.26)$$

m ve J sırasıyla yapı boyunun birim uzunluğu başına kütlesi ve atalet momenti değerleridir. ρ ise havanın yoğunluğudur. Ayrıca,

$$\delta_y, \delta_\theta \dots \dots \dots (1.27)$$

sırasıyla yatay yönde ve burulma yönündeki hareketin logaritmik azalma miktarlarıdır.

Yukarıdaki parametrelere ilave olarak, ağırlık merkezi ve burulma merkezinin geometrik yerleri de modelde ve prototipte aynı olmalıdır. Ayrıca, model ile prototip yapıya etkiyen rüzgarın hızlarının oranı aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{D_p}{D_m} \cdot \frac{N_p}{N_m} \dots \dots \dots (1.28)$$

Burada p ve m indisleri sırasıyla prototip ve model anlamında kullanılmıştır.

1.3.2.4. Aerodinamik Benzeşim

Prototip ile model arasındaki benzerliğin tanımlandığı bir başka parametre Reynolds sayısıdır ($Re = VD/\nu$). Rüzgar tuneli testlerinde, model ile prototip arasındaki Reynolds sayısı eşitliğinin sağlanması pratik değildir. Bununla beraber Severn köprüsü üzerinde yapılan model testleri göstermiştir ki, çoklukla kullanılan keskin kenarlı köprü kesitlerinde akımın benzerliği model ve prototip parametrelerinin geniş değişimlerinde pratik olarak sağlanabilmektedir. Aynı çalışmada, model

üzerindeki kuvvetlerin Reynolds sayısının $Re = 2 \times 10^6$ değerinin altında hassas olduğu daha büyük değerler için Reynolds sayısından bağımsız olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer yapılar için de benzer sonuçlara ulaşan çalışmalar mevcuttur. Bu bulgu model kesit testlerinde kullanılmaktadır.

1.3.3. Rüzgar Tuneli Tipleri

Yapı mühendisliğinde kullanılan rüzgar tuneli tipleri dört temel sınıfta toplanabilir.

Aeronotik Tuneller : Bu tunellerde akım üniform ve düzgündür. Yapı mühendisliğinde kullanılan aerodinamik bilgilerin birçoğu bu tip tunellerde elde edilmiştir. Bu tip tuneller sadece yapıların türbülanssız akımlara cevabını incelemekte kullanılır.

Uzun Tuneller : Atmosferik akımların tamamen benzeştirilebildiği, ince sınır tabakalı, tabanında doğal zemin pürüzlülüğünün oluşturulabildiği tunellerdir. Yapıların her türlü rüzgar testleri burada yapılabilir.

Pasif Aletli Tuneller : İçindeki akımın karakteri birtakım kanat, ızgara veya koniler gibi statik elemanlarla ayarlanabilen tunellerdir. İnce sınır tabakası oluşturulmuştur.

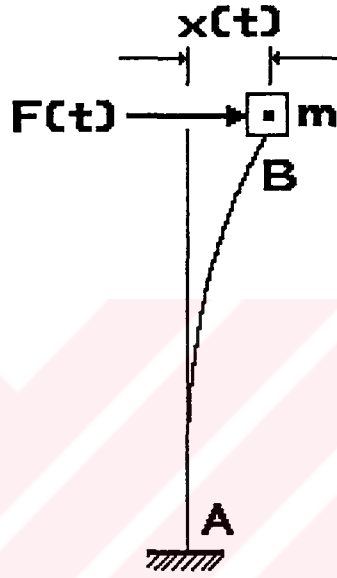
Aktif Aletli Tuneller : Tunelin içindeki akım karakteri jetler veya motorlu kanatçıklar yardımıyla değiştirilir. Ortalama rüzgar profili ve türbülans özellikleri birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilir.

Rüzgar tuneli testleri halihazırda tam anlamıyla standardize edilebilmiş değildir. Farklı tipteki tunellerden elde edilmiş sonuçlar arasında bazı farklılıklar çıkabilir. Ancak benzeştirme koşulları uygulanırken tunel tipleri de dikkate alınarak bu farklılıkların kabul edilebilir sınırlar içinde kalması sağlanabilmektedir.

1.4. YAPILARIN RÜZGAR ETKİSİNE GÖRE ANALİZİ VE BOYUTLANDIRILMASI

1.4.1. Yapı Dinamiği

1.4.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

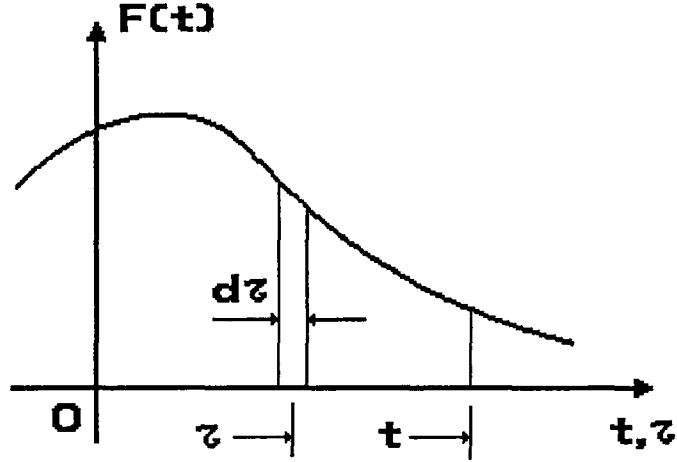


Şekil 1-16. Tek serbestlik dereceli sistemin şematik gösterilimi.

Şekil 1-16 da görülen tek serbestlik dereceli sistemi ele alalım. Eger bu sistemin sönümü viskoz yapıdaysa hareket denklemini aşağıdaki formda yazılabilir.

$$\ddot{y} + 2(2\pi f_o)\xi_o\dot{y} + (2\pi f_o)^2 y = \frac{F(t)}{m} \dots \dots \dots (1.29)$$

Burada f_o yapının doğal frekansını, m kütleyi, ξ_o sönüm oranını ve $F(t)$ ise sisteme etkiyen kuvvetleri göstermektedir. x üzerindeki noktalar zamana göre türev anlamındadır.



Şekil 1-17. Yapı üzerine etkiyen, zamana bağlı bir yükün ardarda gelen impulsar şeklinde toplanması.

Sistemin üzerine etkiyen, zamana bağlı herhangi bir yük Şekil 1-17 de görüldüğü gibi impulsların toplamı olarak düşünülebilir. Sistemin bu yüke karşı cevabı, Duhemal integrali kullanılarak şu şekilde yazılabilir.

$$y(t) = \frac{1}{2m\pi f_{od}} \int_{\tau=0}^t F(\tau) h(t-\tau) d\tau \dots \dots \dots (1.30)$$

Burada $h(t-\tau)$ birim impuls cevap fonksiyonu olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$h(t-\tau) = \exp[-\zeta_o(2\pi f_o)(t-\tau)] \sin[(2\pi f_{od})(t-\tau)] \dots \dots \dots (1.31)$$

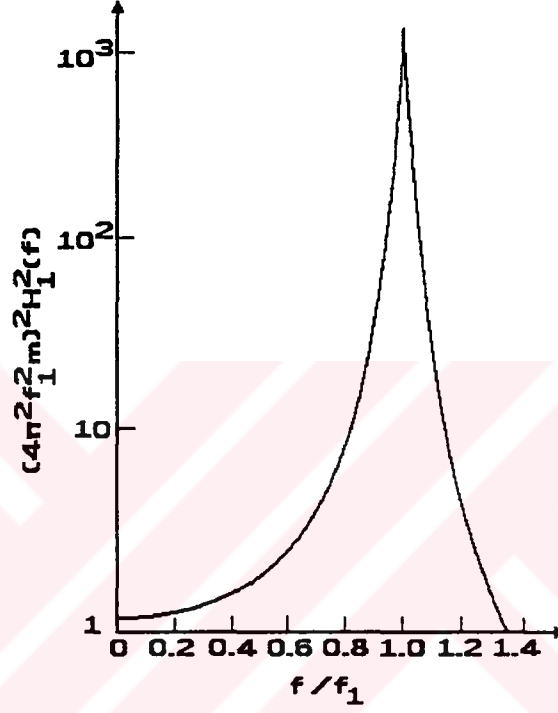
f_{od} ise sönümlü doğal frekans olup, $f_{od} = f_o \sqrt{1-\zeta_o^2}$ şeklinde verilmektedir. Bu integralin değeri hesaplanarak istenen bir zaman için sistemin deplasmanı bulunabilir. Eğer bu sisteme etkiyen dış yük $F(t)$, f frekansında bir harmonik yükse ($F(t) = \sin(2\pi ft)$), bu durumda belli bir zamandaki deplasman şu şekilde hesaplanır.

$$y(t) = F_o H_o(f) \sin(2\pi ft - \varphi) \dots \dots \dots (1.32)$$

Burada t zaman, φ faz açısı, $H_o(f)$ transfer fonksiyonu olup,

$$H_o(f) = \frac{1}{4\pi^2 f_o^2 m [(1-(f/f_o)^2)^2 + 4\xi_o^2 (f/f_o)^2]^{1/2}} \dots \dots \dots (1.33)$$

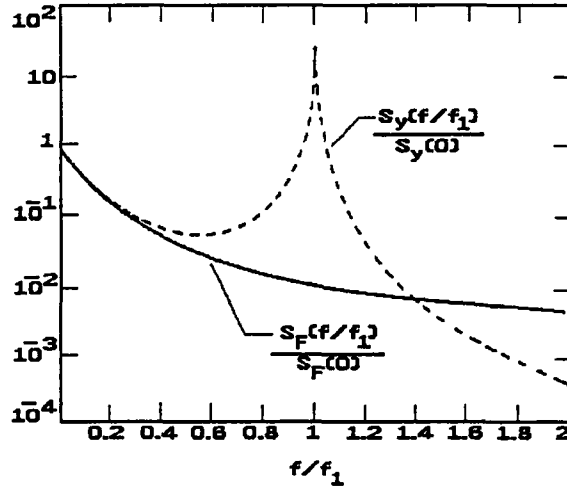
şeklinde yazılabilir. Şekil 1-18 de f/f_o e karşı, $\xi_o = 0.01$ sönüm oranı için $(4\pi^2 f^2 m)^2 H_o^2(f)$ ifadesinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1-18. $H_1^2(f)$ fonksiyonu

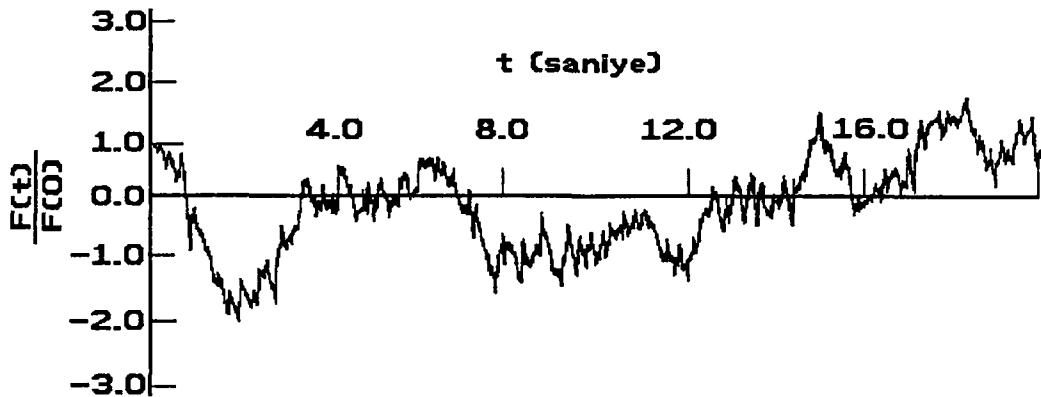
Rüzgar mühendisliği problemlerinde, yükler çoğunlukla çok sayıda ve her-biri değişik frekansta harmonik yüklerin süperpozisyonu şeklinde ortaya çıkar. Yapıya etkiyen kuvvete ait spektral yoğunluk fonksiyonu, kuvvetin içindeki har-monik parçaların miktarını verir. Eğer sisteme spektral yoğunluğu $S_F(f)$ fonksiyo-nuyla tanımlı bir kuvvet etkimekteyse, yapının buna karşı vereceği cevaba ait spektral yoğunluk fonksiyonu $S_Y(f)$ şu şekilde hesaplanır.

$$S_x(f) = H_o(f)^2 S_F(f) \dots \dots \dots (1.34)$$

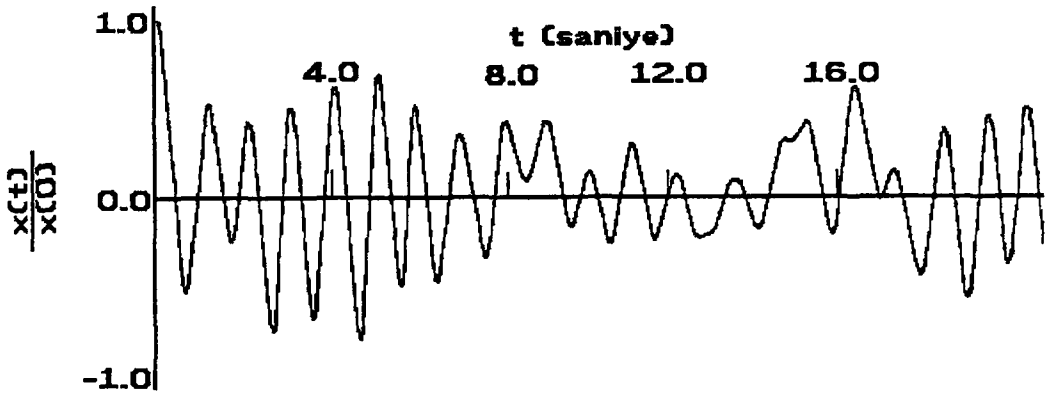


Şekil 1-19. Bir sisteme etkiyen kuvvet ve buna cevabın spektral yoğunluk fonksiyonları.

Ele aldığımız sistem, Şekil 1-19 da spektral yoğunluk fonksiyonuna ait eğrisi görülen bir $S_F(f)$ kuvveti ile zorlandığında 1.4.6 denklemi kullanılarak hesaplanan $S_Y(f)$ cevap spektral yoğunluk fonksiyonu yine aynı şekil üzerinde görülmektedir. $S_Y(f)$ fonksiyonunun şeklinden de görülebileceği gibi zamana bağlı deplasman fonksiyonu yapının f_o doğal frekansına eşit veya yakın harmonik frekans bileşeni ağırlıklı rastgele bir fonksiyondur. $S_F(f)$ ve $S_Y(f)$ spektral yoğunluk fonksiyonlarına karşı gelen, zamana bağlı kuvvet ve deplasman ifadeleri, Şekil 1-20 ve Şekil 1-21 de verilmiştir. Bu kayıtlar açıkça gösterir ki, $F(t)$ fonksiyonu frekans içeriği bakımından deplasman fonksiyonundan daha zengindir. Sistem kendine etkiyen kuvvete bir mekanik filitre tatbik etmiştir.



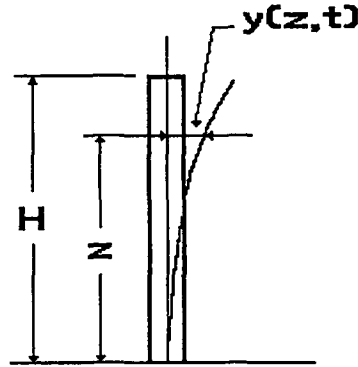
Şekil 1-20. Aerodinamik kuvvetin kaydı $F(t)$.



Şekil 1-21. $F(t)$ kuvvetine karşı yapının $y(t)$ cevabının kaydı.

1.4.1.2. Sürekli Kütle Yayılımlı Sistemler

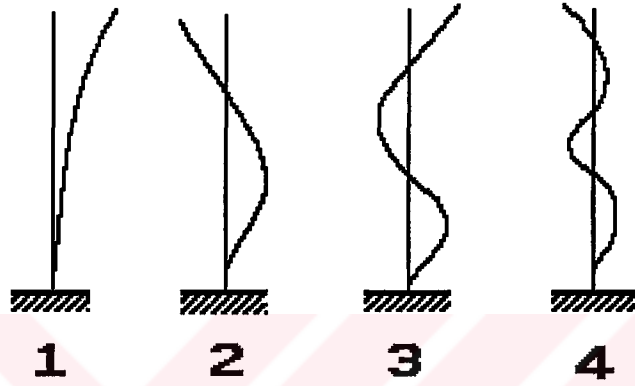
Yapıların, genelde birden fazla yöne hareket edebilme serbestlikleri vardır. Ayrıca, kütle ve rijitlik gibi yapısal parametreleri de, hacımları üzerine yayılı şekildedir. Şekil 1-22 de, bir boyutu diğerlerinin yanında çok büyük bir yapı gösterilmiştir. Bu şekildeki sürekli, lineer elastik ve viskoz sönümlü sistemlerin zamana bağlı deplasman fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir.



Şekil 1-22. Sürekli parametrelili sistemler.

$$y(z,t) = \sum_i \mu_i(z) q_i(t) \dots \dots \dots (1.35)$$

Burada, $\mu_i(z)$, i . modun şekli fonksiyonu, $q_i(t)$ i . moda göre genelleştirilmiş koordinatlar veya başka bir ifadeyle i . modun cevaba katkı faktörüdür.



Şekil 1-23. Yüksek yapılara ait mod şekilleri

$\mu_i(z)$ mod şekil fonksiyonu, yapının kütle ve rijitlik dağılımının bir fonksiyonudur ve yükten bağımsızdır (Şekil 1-23). Her moda, bir f_i doğal frekansı ve ζ_i sönüm oranı karşı gelir. Modal sönüm oranları ζ_i ler, deneysel olarak belirlenir. Her genelleştirilmiş koordinat $q_i(t)$, f_i frekanslı, ζ_i sönüm oranlı ve M_i^* kütleli bir serbestlik dereceli sistemin, F_i^* kuvveti altında yaptığı deplasmanları olarak ifade edilebilir. M_i^* ve $F_i^*(t)$, i . modun genelleştirilmiş kütle ve kuvvet değerleri olarak isimlendirilir.

$$M_i^* = \int_0^H \mu_i^2(z) m(z) dz \quad (i=1,2,\dots) \dots \dots \dots (1.36a)$$

$$F_i^* = \int_0^H p_i(z,t) \mu_i(z) dz \quad (i=1,2,\dots) \dots \dots \dots (1.36b)$$

Burada H yapı uzunluğu, $m(z)$ yapının birim uzunluğunun kütlesi, $p(z,t)$ yapının birim uzunluğuna etkiyen yayılı yüküdür.

Eğer bir yapının A yüzeyine rastgele karekterdeki bir yük etkirse, sistemin bu yüke deplasman olarak cevabı şu şekilde hesaplanacaktır.

$$S_y(z, f) = \sum_i H_i^2(n) \mu_i^2(z) \int_{A_1} \int_{A_2} \mu_i(z_1) \mu_i(z_2) S_{N_1, N_2}(n) dA_1 dA_2 \dots (1.37)$$

Burada $H_i(n)$ ifadesi (1.33) denkleminde verildiği şekilde transfer fonksiyonudur. (1.33) denklemi (1.37) içinde yerine konmadan önce bu denklemdeki m , M_i ile değiştirilmelidir. $S_{N_1, N_2}(n)$, dinamik basıncın A alanı içindeki N_1, N_2 noktalarına gelen etkilerin çapraz spektral yoğunluk fonksiyonudur.

Daha önce de belirtildiği gibi, verilen bir n değeri için N_1 ve N_2 arasındaki mesafe arttıkça bu noktalara etkiyen yükler arasındaki koherans değeri azalır. Ortalama rüzgar yönü dikdörtgen formundaki yapıya dikse dinamik basınç, hız titreşimleriyle aynı yapıdadır. Bu nedenle, zamana bağlı rüzgar basıncının çapraz spektral yoğunluk fonksiyonu; rüzgarın, esiş yönündeki zamana hızının çapraz spektral yoğunluk fonksiyonu ile aynıdır.

Spektral yoğunluk fonksiyonu tanımından yola çıkarak dinamik deplasmanların zaman üzerine kareleri ortalaması,

$$\sigma_y^2 = \overline{y^2(z)} = \int_0^\infty S_y(z, n) dn \dots \dots \dots (1.38)$$

olarak elde edilir. Tepe deplasmanının beklenen değeri ise,

$$y_{pk}(z) = K_y(z) \sigma_y \dots \dots \dots (1.39)$$

şeklinde yazılır. Burada, birçok rüzgar mühendisliği problemlerinde geçerli olmak üzere $K_y(z) \approx 3.5$ alınabilir [12].

1.4.1.3. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Çok serbestlik dereceli sistemler için titreşim denklemleri, kütlelerin düğüm noktalarında toplandığı kabulüyle ayrık şekilde de yazılabilir. Böylece lineer yapıdaki, viskoz sönümlü bir sistem için hareket denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$[M]\{\ddot{y}(t)\} + [C]\{\dot{y}(t)\} + [K]\{y(t)\} = \{F(t)\} \dots \dots \dots (1.40)$$

Bu denklemdeki $[M]$, $[C]$, ve $[K]$ matrisleri sırasıyla $n \times n$ boyutunda kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. $\{y(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ ise n -boyutlu deplasman ve kuvvet vektörleridir. Bu denklemin çözümü modal analiz yöntemi kullanılarak yapılabilir. Önce $[C] = 0$ ve $F(t) = 0$ kabulü yapılarak denklem,

$$[M]\{\ddot{y}(t)\} + [K]\{y(t)\} = 0 \dots \dots \dots (1.41)$$

şekline gelir. Bu (1.41) denkleminde yapının n adet doğal frekans ve mod şekline karşılık gelen özdeğer ve özvektörleri elde edilir. Mod şekli vektörlerine bağlı olarak deplasman vektörü $\{y(t)\}$ şu şekilde ifade edilir.

$$\{y(t)\} = [\mu]\{q(t)\} \dots \dots \dots (1.42)$$

Burada $[\mu]$ mod şekli vektörlerini içeren $n \times n$ boyutlu matristir. $[\mu]$ nin her kolonu bir mod şekli vektörüne karşılık gelir. $\{q(t)\}$ modal şiddetleri gösteren n boyutlu genelleştirilmiş koordinat vektörüdür. (1.42) denkleminin toplam formunda yazılmış hali,

$$y_k(t) = \sum_{i=1}^n \mu_{ki} q_i(t) \dots \dots \dots (1.43)$$

şeklinde olup μ_{ki} , $[\mu]$ matrisinin k . satır ve i . kolonundaki değeri göstermektedir. Bu n -serbestlik dereceli sistemin mod şekillerinin önemli bir özelliği ortagonallikleridir. Bu özelliğe dayanarak $i \neq j$ için şu ifadeler yazılabilir.

$$\{\mu_i\}^T [M] \{\mu_j\} = 0 \dots \dots \dots (1.44a)$$

$$\{\mu_i\}^T [K] \{\mu_j\} = 0 \dots \dots \dots (1.44b)$$

$\{\mu_i\}$ ve $\{\mu_j\}$, i . ve j . mod şekli kolon matrislerini, T harfi, matrisin transpoze olduğunu göstermektedir. Sönüm matrisi kütle ve rijitliğin $C = c_m M + c_k K$ şeklinde lineer bir kombinasyonu olarak alınması halinde, aynı ortagonallik kuralı bunun için de uygulanabilir.

$$\{\mu_i\}^T [C] \{\mu_j\} = 0 \quad (i \neq j) \quad \dots \dots \dots (1.44c)$$

Bu özellikler sayesinde (1.40) daki hareket denklemi n adet bağımsız modal denkleme ayrılabilir. (1.42) denklemi, (1.40) denkleminde yerine konursa ve ayrıca bu denklemin her iki tarafı da i . mod şekli vektörünün transpozuyla sol taraftan çarpılırsa,

$$\begin{aligned} \{\mu_i\}^T [M] \{\mu_i\} \{\ddot{q}(t)\} + \{\mu_i\}^T [C] \{\mu_i\} \{\dot{q}(t)\} + \{\mu_i\}^T [K] \{\mu_i\} \{q(t)\} \\ = \{\mu_i\}^T \{F(t)\} \dots \dots \dots (1.45) \end{aligned}$$

elde edilir. Bu denkleme i . modal denklem denir ve Denklem (1.44) da yazılan ortogonallik şartları uygulanarak elde edilmiştir. Daha basit bir şekilde yazımı sağlayabilmek için aşağıdaki notasyonu kullanabiliriz.

$$M_i^* = \{\mu_i\}^T [M] \{\mu_i\} \dots \dots \dots (1.46)$$

$$C_i^* = \{\mu_i\}^T [C] \{\mu_i\} \dots \dots \dots (1.47)$$

$$K_i^* = \{\mu_i\}^T [K] \{\mu_i\} \dots \dots \dots (1.48)$$

$$F_i^*(t) = \{\mu_i\}^T \{F(t)\} \dots \dots \dots (1.49)$$

M_i^* , C_i^* , K_i^* , ve $F_i^*(t)$ sırasıyla k . genelleştirilmiş kütle, sönüm, rijitlik ve kuvvet matrisleridir.

$$C_i^* = 2\xi_i(2\pi f_i)M_i^* \dots \dots \dots (1.50a)$$

$$K_i^* = (2\pi f_i)^2 M_i^* \dots \dots \dots (1.50b)$$

İfadelerini kullanırsak, ξ_i ve f_i sırasıyla i . modun sönüm oranı ve frekansı olmak üzere i . modal denklem şu hale gelir.

$$\ddot{q}_i(t) + 2(2\pi f_i)\zeta_i \dot{q}_i(t) + (2\pi f_i)^2 q_i(t) = \frac{F_i^*(t)}{M_i^*} \dots \dots \dots (1.51)$$

Bu denklem, m yerine M_i^* koyulması halinde Denklem (1.29) de yazılan ve tek serbestlik dereceli sistemlere ait olan denklemle aynıdır. Orada açıklandığı gibi (1.30) ve (1.31) denklemlerini kullanarak bütün modlara ait $q_i(t)$ modal deplasmanları hesaplanır. Sistemin gerçek deplasmanına geçmek için bu değerler (1.42) denkleminde uygulanır.

Eğer sisteme etkiyen yükler rastgele karakterdeyse, sistemin buna cevabını hesaplamak için rastgele titreşim tekniklerinin kullanılması gerekir. Dinamik rüzgar etkisi gibi sıfır ortalama etkiler için en popüler metod spektral analiz tekniğidir. Bu yöntemde yük, spektral yoğunluk fonksiyonu (Power Spectral Density Function) ile tanımlı olup yapının cevabı da deplasman ait spektral yoğunluk fonksiyonu şeklinde elde edilir. Kaynak [13] de bu yöntem detaylı şekilde açıklanmaktadır.

$$S_y(z, f) = \{\mu(z)\} [H(f)] [S_F(f)] [H(f)]^T \{\mu(z)\}^T \dots \dots \dots (1.52)$$

Burada $S(z, f)$, deplasmanın; $[S_F(f)]$ genelleştirilmiş kuvvetin spektral yoğunluk fonksiyonudur. $\{\mu(z)\}$ ise z noktasındaki modal koordinatların toplandığı vektördür. $[H(f)]$ yapının frekans cevap fonksiyonu matrisidir.

$$[H(f)] = \left[-(2\pi f)^2 [M^*] + i(2\pi f) [C^*] + [K^*] \right]^{-1} \dots \dots \dots (1.53)$$

$i = \sqrt{-1}$ ve $[H(f)]$, $[H(f)]$ in kompleks eşleniğidir. Elde edilen bu deplasmanın spektral yoğunluk fonksiyonunun (1.11) denklemindeki gibi sıfırdan sonsuza kadar toplamı, zamana bağlı deplasman fonksiyonunun kareleri ortalamasını verir.

1.4.2. Yapıların Rüzgar Yüklerine Cevabının Hesabında Kullanılan Yöntemler

Rüzgar, yapılar üzerine temel olarak üç değişik şekilde etki eder. Bunlar, estiği yönde yaptığı itki etkisi, bu yöne dik yönde oluşan kuvvetler ve son olarak yüklerin yapının rijitlik merkezine göre momentlerinin birbirlerini dengeleyemeleri yüzünden ortaya çıkan burulma etkisidir.

Bu etkilerin hesaplanmasında kullanılan yöntemler de genel olarak dört grupta toplanabilir.

- 1.) Rüzgarın sadece statik etkisini dikkate alarak yapılan hesap,
- 2.) Statik ve dinamik etkileri beraberce düşünerek yapılan dinamik hesap,
- 3.) Statik ve dinamik etkinin beraberce olusturması beklenen toplam en yüksek deplasman sonucunu verecek şekilde hesaplanan eşdeğer bir statik yükle yapılan hesap,
- 4.) Karmaşık aerodinamik yapısı olan problemlerde rüzgar tuneli testleri yapmak.

Bugün dünyada, yüksek yapıların projelendirilmesinde rüzgarın sadece statik etkisinin dikkate alınması, hemen hemen terk edilmiş sayılabilir. Buna rağmen “Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri (TS498)” isimli Türk yük standardı [14] rüzgar yükünü statik bir etki olarak ele almaktadır. Rüzgar hızı ve buna bağlı olarak statik rüzgar yükü yükseklikle artmaktadır (Şekil 1-3). TS498 de ise bu hız artımı yapı yüksekliğine bağlı olarak kabaca verilmiştir. Hesaplamalar sırasında, darbe faktörü ve çevre pürüzlülük yapısı hiç dikkate alınmamaktadır. Bu yönetmeliğin, köprü, vinçler, yüksek bacalar, radyo ve benzeri yayın kuleleri ve yüksek gerilim hatları gibi narin ve fleksibül yapılar için geçerli olmadığı belirtilmekle beraber, kapsamı içinde tutulan yüksek yapıların ve narin cephe kaplamalarının hesabında da kullanılmasının sakıncalı olacağı şüphesizdir.

Yapının birim yüzeyine, rüzgarın esiş yönünde etkiyen basınç kuvveti (1.16) da verilen Bernoulli Denklemi sayesinde çıkartılmıştır. İlk olarak bu değerın hesaplanması gerekir.

$$q = CV^2 \dots \dots \dots (1.54)$$

Burada V rüzgar hızı, C ise $C = \rho / (2g)$ şeklinde verilen bir katsayıdır. $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ve $g = 10.0 \text{ m/sn}^2$ olarak alınabilir. Bu durumda, $C = 625 \times 10^{-6}$ olarak hesaplanır. Kanada Yönetmeliği, bu katsayıyı bir miktar daha büyük olarak tavsiye etmiştir. Burada C katsayısı, rüzgar hızı için kullanılacak birime göre değişik değerler alır. V için km/saat birimi kullanılırsa $C = 50 \times 10^{-6}$, m/sn kullanılırsa C

= 650×10^{-6} olarak alınması gerekir. Bütün bu haller için q değeri kN/m^2 olarak bulunacaktır.

TS498, yapının geometrisine göre değişik yüzeylerin rüzgarla yaptığı açılara bağlı olarak basınç veya emme katsayıları vermiştir. q basınç kuvveti bu katsayılarla çarpılarak, gerçek rüzgar basınçları hesaplanmaktadır.

Zamanla, bu konuda yapılan araştırmalar, rüzgarın dinamik etkisinin, statik etkisinin yanında çok önemli seviyelere ulaşabileceği gerçeğini ortaya çıkartmıştır. Dinamik etkilere maruz yapıların hesabıyla ilgili bilgiler, Bölüm 1.4.1.2 ve Bölüm 1.4.1.3 de özetle açıklanmıştır. Yapı ister sürekli kütleli, isterse ayrık kütleli olarak kabul edilsin, buna etkiyen $S_w(f)$ spektral yoğunluk fonksiyonuna sahip rüzgar kuvvetlerine cevabı (1.37), (1.39) ve (1.52) denklemlerinden hesaplanabilir. Bu cevabın spektral yoğunluk fonksiyonları, yapıya ait her mod için bulunduktan sonra (1.43) denklemi sayesinde toplanarak sonuç deplasman ve ivmeler elde edilir. Fakat, bu yöntem özellikle pratikteki proje mühendisleri için uzun ve zahmetlidir.

Diğer bir yol ise, statik eşdeğer yük yöntemidir. Bu yöntemde yapıya, dinamik deplasmana eşit deplasman oluşturacak eşdeğer bir statik yük yüklenir. Günümüzde, birçok yük standardı bu yöntemi tercih etmiştir. Değişik yapı tiplerini ve çevre koşullarını dikkate almak açısından, en iyi hazırlanmış standart Kanada Yapı Standardıdır (NBC) [4]. Amerikan Yük Standardı ANSI A58.1-1981 [5] Kanada Standardının çok benzeri olup bazı eksikleri vardır.

Rüzgar basıncının hesabı, Kanada Standardında da (1.54) denkleminde tanımlanan ifadeden yararlanılarak yapılır. İstenen analitik hesaplar iki türdür. Birincisi basit yaklaşım, diğeri detaylı yaklaşım olarak adlandırılır. Rüzgarın boyutlandırmada birinci derecede etkin rol oynadığı yüksek ve narin yapılar ile iki taraflı konsol sundurmalar gibi rüzgara hassas yapılarda, mutlaka rüzgarın dinamik etkisini dikkate alan detaylı yaklaşımın kullanılması veya bunun yerine; rüzgar tuneli veya benzeri bir deneysel metodun uygulanması istenmektedir.

Tek başına basit yaklaşım binaların cephe kaplamalarının boyutlandırılmasında kullanılabilir. Yüksek ve narin yapıların hesabında, mutlaka detaylı yaklaşımın kullanılması gerekir. Bu eşdeğer statik yük yönteminde, önce yapının bulunduğu yerin pürüzlülüğü ve kotu dikkate alınarak rüzgarın türbülans yoğunluğu belirlenir. İkinci aşamada yapının genişlik, yükseklik, doğal frekans ve sönüm parametreleri belirlenir. Bunların değerlendirilmesi sonucunda; referans rüzgar

basıncı ile çarpılacak C_g Darbe Faktörü, C_e Açıklık Faktörü ve statik yükün elde edilmesinde kullanılacak olan C_p Basınç Katsayıları elde edilir.

C_e açıklık faktörü, çevre pürüzlülük karakterine ve yük hesaplanacak noktanın yerden yüksekliğine göre değişen bir katsayıdır. Yükseklikle değişimde kuvvet kuralı kullanılmıştır (1.2). Basit yaklaşımda bu ifade için $\alpha = 0.20$ olarak alınacaktır. Detaylı hesaplarda ise açık alan, kasaba ve şehir merkezi olarak üç çevre karakteri için ayrı formüller verilmiştir.

$$\text{Açık Alan} : C_e = (z/10)^{0.28} \dots \dots \dots (1.55a)$$

$$\text{Kasabalar} : C_e = 0.5(z/12.7)^{0.50} \dots \dots \dots (1.55b)$$

$$\text{Şehir Merkezleri} : C_e = 0.4(z/30)^{0.72} \dots \dots \dots (1.55c)$$

Darbe faktörü katsayısı C_g ise, basit yaklaşımda taşıyıcı sistemler için 2.0, camlar ve cephe kaplamaları için ise 2.5 olarak tavsiye edilmektedir. Buna karşılık detaylı yaklaşımda yükün karakterine bağlı bir formül verilmiştir.

$$C_g = 1 + g_p \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \dots \dots \dots (1.56)$$

Burada σ , toplam yükün standart sapması, μ , toplam yük etkisinin ortalama değeri ve g_p , yükün pik faktörüdür. σ/μ ve g_p için birtakım amprik formül ve abaklar verilmiştir.

Eşdeğer statik yüke geçmek için kullanılacak olan C_p basınç katsayıları, yapı tipine ve yapı yüzeylerinin rüzgarla yaptığı açılara göre verilmiştir. Bu durumda p gerçek rüzgar basıncı değeri, genel olarak şu şekildedir.

$$p = C_e C_g C_p q \dots \dots \dots (1.57)$$

Yapının rüzgara dik yöndeki hareketinin, sadece vorteks etkisinden kaynaklandığı kabul edilmiştir. Vorteksin frekansı, yapının doğal frekansına eşit olduğu sırada rüzgar hızı şöyle hesaplanır.

$$V_H = \frac{1}{S} f D \dots \dots \dots (1.58)$$

Burada f , frekansı (Hz), S , Strouhal Sayısını, V_H , yapının tepesindeki ortalama rüzgar hızını, D , silindirik bir yapının çapını göstermektedir. Silindirik veya silindiriğe yakın enkesitteki yapılarda, Strouhal sayısı Reynolds sayısının bir fonksiyonu olduğundan, bu formülün kullanılabilmesi için Reynolds sayısına bağlı bir grup ifade verilmiştir.

Bu tip yapılarda vortekslerin oluşturduğu etki, yapının tepeden itibaren 1/3 noktasına etkiyen bir F_L statik kuvveti ile ifade edilerek hesap yapılır.

$$F_L = \frac{C_1}{\sqrt{\lambda} \sqrt{\beta - C_2 \frac{\rho D^2}{m}}} q_H D \dots \dots \dots (1.59)$$

Burada β , kritik sönüm oranı, $\lambda = H/D$, H , yapı yüksekliği, q_H , V_H hızından oluşan basınç, m , birim uzunluğa yayılı kütle değerleridir. V_H ve yapı tipine göre değişik C_1 ve C_2 katsayıları verilmiştir.

Ayrıca standarda, yüksek yapıların yatay hareketini inceleyen bir bölüm ilave edilmiştir. Bu bölümde, yapıların tepesinde, rüzgarın esiş yönünde ve ona dik yönde oluşan en büyük ivmelerin tunel testlerinden elde edilen değerleri verilmiştir. Ayrıca bu sonuçlara göre çıkartılmış amprik formüller de verilmektedir.

$$a_W = f_W^2 g_p \sqrt{W D} \left(\frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_w}} \right) \dots \dots \dots (1.60)$$

$$a_D = 2\pi^2 f_D^2 g_p \sqrt{\frac{K_s F}{C_e \beta_D}} \left(\frac{\delta}{C_g} \right) \dots \dots \dots (1.61)$$

Burada W, D , yapının rüzgara paralel ve dik yöndeki boyutları, a_W, a_D , yukarıda tanımlanan yüzeylere dik ivme değerleri, $a_r = 78.5 \times 10^{-3} [V_H / n_W \sqrt{W D}]^{3.3}$, (Pa), ρ_B binanın ortalama yoğunluğu, (kg/m^3), β_W, β_D , rüzgara dik ve rüzgar doğrultusundaki sürtünme kritik sönüm değeri, f_W, f_D , iki yöndeki doğal frekanslar, Δ , yapıda rüzgar yönünde oluşan en büyük yatay deplasman (m), K , çevre pürüzlülüğüne bağlı bir katsayı olup, (1.55) denkleminde tanımlanmış olan bölgeler için

0.08, 0.10 ve 0.14 olarak verilmistir. s , F , ise iki katsayı olup, değerleri verilmiş olan abaklardan hesaplanabilir.

Ayrıca bu standartta, yüksek yapılardaki yanal deplasmanları hesaplamak için ise, yapının mod şeklini doğrusal formda, kütesini üniform yayılı kabul eden ve statik yükün modal yolla çözümünü içeren bir yaklaşım önerilmektedir. Burada dikkate alınan, statik yük olup, dinamik etki ise daha önce açıklandığı şekilde hesaplanan darbe faktörünün hesaba katılmasıyla gözönüne alınmış olur.

Pencereler, ara duvarlar, cephe kaplamalar, çok değişik geometrik yapıdaki binalar, bacalar, kablolar, yapı elemanları, köprüler ve kafes kirişler ayrı ayrı incelenmiş ve C_p basınç-emme katsayıları her tip için verilmiştir.

C_e , C_g , C_p katsayılarının hesaplanması ve kullanılması ile ilgili kısımlar Amerikan Standardında da ele alınmıştır. Fakat bunun dışında söz edilen diğer detaylara sadece Kanada Standardında rastlanmaktadır.

BÖLÜM 2

BU KONUDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Rüzgar mühendisliği konusunda yapılan çalışmalar, genel olarak ikiye ayrılmaktadır. Bir grup araştırmacı deneysel olarak çalışırken diğer bir grup ise analitik yöntemler üzerinde çalışmayı tercih etmektedirler. Bu dalları da, kendi içinde alt gruplar halinde incelemek mümkündür.

Deneysel çalışmaların içinde gerçek yapılar üzerinde çalışmak ve ölçümler yapmak, tunel çalışmalarına göre daha pahalı ve zordur. Bu nedenle, bu tip çalışmalara daha az rastlanmaktadır. Rüzgarın yapılar üzerine uyguladığı kuvvetler, yapının geometrisi ve çevre pürüzlülüğü gibi yapıya-özel parametrelere bağlı olduğundan, bu konunun araştırması hala güncelliğini kaybetmemiştir. Bu arada, rüzgar etkisiyle yüksek yapılarda oluşan titreşimlerin sınırlanması problemi de, üzerinde çok çalışma yapılan konulardan birisi haline gelmiştir. 8.Nisan.1986 tarihinde Seattle, Washington' da yapılan ve Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluğunun Rüzgar Etkileri Komitesi tarafından düzenlenen bir toplantıya sunulan çalışmalarda, tanınmış birçok yüksek yapı üzerinde yapılan ölçümlerin sonuçları ve bu yapılarda kullanılan titreşim söndürücülerin etkileri araştırılmıştır [15].

Bugün dünyanın gelişmiş ülkelerindeki birçok üniversite ve kuruluştaki olduğu gibi özel şirketlerin araştırma birimlerinde dahi bir rüzgar tuneli mevcuttur. Bu nedenle, tunel testleri ile ilgili çalışmalar oldukça fazladır. Bu çalışmaların ana hedeflerinden birisi de, yine rüzgarın yapılar üzerinde oluşturduğu yüklerin tespit edilmesidir. Model üzerinden ne kadar sık olarak ölçüm yapılırsa, o kadar doğru sonuca varılacağı açıktır. Fakat bu durum, çok sayıda sensör ve bunlardan çıkan sinyalleri değerlendirecek çok kanallı bilgi değerlendirme sistemleri ihtiyacını ortaya çıkartmaktadır. Daha az noktadan ölçüm yaparak gereken sonuçları üretmek, önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. M.S. Islam, B. Elligwood ve R.B. Corotis tarafından yapılan bir çalışmada, zaman serileri modellemesi ve ARMA filtresi tekniği kullanılarak daha az sayıda noktadan yapılan ölçümlerin birleştirilmesi tekniği geliştirilmiş [16] ve kare şeklindeki bir yapı için rüzgarın esiş

yönünde, buna dik ve burulma tipindeki spektrumları, birinci ve ikinci mod şekillerini dikkate alarak elde edilmiştir. [17]

Benzeri bir çalışma A.Kareem tarafından yapılmıştır [18]. Bu çalışmada iki farklı sınır tabakası için yine kare şeklindeki yapılarda rüzgara dik yöndeki türbülans spektrumları elde edilmiştir.

Yüksek yapıların rüzgar etkilerine karşı cevabı genellikle doğrusal formda kabul edilen birinci mod için elde edilmektedir. Simiu [19] göstermiştir ki, yüksek modların deplasmana katkısı hemen hemen hiç yokken ivmenin (RMS) değeri üzerine katkısı %5 ile %20 arasında değişmektedir. Kareem, yüksek modların ivmeye katkısını hesaplayabilmek amacıyla basit fakat yaklaşık bir yöntem önermektedir [20].

Sınır tabakası içinde kalan yapılarda oluşan kuvvetlerin belirlenmesi, rüzgar tuneli çalışmalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu konuda da yapılmış birçok çalışma mevcuttur (Vickery [21]; A.Kareem [22]; A.Kareem, J.E.Cermak [23]).

Davenport' un 1961 [1] yılında yayınlanan ve rüzgarın yapılara esiş yönündeki etkisini frekans bazında inceleyen çalışmasını takip eden yıllarda bu formülasyon üzerine yapılan çalışmalar iki farklı yoldan ilerlemiştir. Bir taraftan detaylı matematik yöntemler ve bu yöntemlere göre çözüm yapan bilgisayar programları geliştirilirken; diğer taraftan, pratik mühendislik uygulamaları için elle hesap yapmaya yarıyacak basit yöntemler üzerine çalışmalar devam etmiştir. Üretilen bu tekniklerden bir kısmı ise, çeşitli ülkelerin yapı standartlarında kullanılmıştır.

Rüzgarın yapılar üzerine etkisi temel olarak, rüzgarın esiş yönünde, bu yöne dik ve burulma olmak üzere üç parça halinde incelenebilmektedir. Simiu [19] rüzgarın yapı üzerine esiş yönünde yaptığı etkileri incelediği çalışmasında, yapıyı lineer elastik kabul etmiş ve birinci mod şeklini lineer olarak almıştır. Burada yüksek modların yapının cevabına katkısının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada, rüzgar yönündeki hız spektrumu olarak Velozzi ve Cohen'in [24] çalışmalarında önerilen, rüzgara dik spektrum olarak da Davenport' un [10] çalışmasındaki ifadeler kullanılmıştır. Sonuç olarak burada, yapının rüzgar yönündeki deplasman ve ivme olarak cevabını hesaplamaya yarayan bir yöntem sunulmuştur. Ayrıca değişik boy ve genişlikteki yapılar için, bu etkileri hesaplayabilmek amacıyla abaklar verilmektedir. Simiu ve Lozier [25]' in diğer bir

çalışmasında da, bu yöntemi kullanan ve yüksek modların etkilerini de dikkate alabilen bir bilgisayar programı sunulmaktadır.

Foutch ve Şafak' ın çalışmalarında [26,27] dikdörtgen şeklinde enkesite sahip yapılarda, rüzgar yüzeyine gelen kuvvetlerin oluşturduğu burulma momenti etkisini hesaplayabilmek için bir yöntem sunulmaktadır. Aynı yazarların daha sonra yayınlanmış olan diğer çalışmalarında [28] burulma ve ötelenme etkileri beraberce dikkate alınarak karşılıklı etkileşimli bir hesap yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem kullanılarak, değişik tipteki yapılar üzerinde yapılan çözümler sonucunda şu sonuçlara varıldığı belirtilmektedir. (1) Çok yüksek yapılarda, genellikle rüzgara dik yöndeki hareket, yapının rüzgar yönündeki hareketinden büyüktür. Daha kısa yapılarda ise dizayn sırasında iki etki de eşit kabul edilebilir. (2) Eğer yapı simetrik değilse veya simetrik olmasına rağmen burulma doğal frekansı en düşük ötelenme doğal frekansından daha düşük veya eşitse, bu durumda boyutlandırma işlemi sırasında burulma titreşimleri dikkate alınmalıdır. (3) Ön cephenin ve yapısal simetri bozukluğunun artması, burulma doğal frekansının azalması hallerinde, burulma titreşimlerinin şiddeti büyür.

Elastik merkezi, kütle merkezi ve aerodinamik merkezi üstüste gelmeyen yapılarda burulma titreşimleri ile ötelenme titreşimleri birlikte ortaya çıkar. J.N.Yang, Y.K.Lin ve B.Samali [29] tarafından yapılan çalışmada, transfer matrisi yöntemiyle bu problemin çözümü açıklanmıştır.

Yüksek yapıların rüzgara dik yöndeki hareketlerinin birçok kere rüzgar yönündeki hareketinden daha önemli olduğu değişik çalışmalarla ispatlanmıştır. Yapının bu yöndeki cevabını hesaplamak üzere, A.Kareem [30] tarafından yaklaşık bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemin, ön projelendirme işleminde kullanılmak üzere hazırlandığı belirtilmiş ve verilen örnek sistemler için yapılan hesaplar, daha sonra tunel testleriyle denenmiş ve yöntemin hassasiyeti belirlenmeye çalışılmıştır.

Rüzgarın yapı üzerine esiş yönündeki etkisinin hesabını kolaylaştırmak için geliştirilen yöntemlerin başında, Davenport' un 1967 yılında yayınladığı çalışmada önerilmiş olan [31] gelmektedir. Bu çalışmada dinamik etkinin basit bir şekilde belirlenebilmesi için, statik etki profilinin bir darbe faktörü ile çarpılarak yapıya uygulanması teklif edilmektedir. Bu darbe faktörü, rüzgarın yapıda oluşturması beklenen dinamik deplasman cevabı, statik yükleme sonucunda ortaya çıkacak şekilde belirlenir. Bu çalışmanın sonuçları, bugün birçok yük standardında kullanılmaktadır.

şekilde belirlenir. Bu çalışmanın sonuçları, bugün birçok yük standardında kullanılmaktadır.

Hemen arkadan, Velozzi ve Cohen' in aynı amaçlı bir çalışması yayınlanmıştır [24]. Bu çalışmada özellikle Amerikan Yük Standardında rüzgar hızı olarak, meteorolojik ölçümler sonucunda rastlanan en yüksek rüzgar hızlarının kullanıldığı vurgulanmış ve ekonomik olmayan bir projelendirmeden kaçınmak için, darbe faktörünün hesaplanması sırasında bu durumun göz önünde tutulması gerektiği belirtilmiştir.

Frekans bazında yapılan çalışmaların yanısıra bir alternatif olarak, zaman bazında çalışmalar da yapılmaktadır. Bilindiği gibi frekans bazındaki metotlarla yapının lineer olmayan davranışını belirlemek kolay değildir. Bu arada birçok bilgisayar programı dış yük olarak zamana bağlı yük almaktadır. Bu nedenle zaman bazındaki yöntemler de, bazı hallerde kullanışlı olabilmektedir.

G.Solari, 1988 yılında "Eşdeğer Rüzgar Spektrumu" [32] isimli bir makale yayınlamıştır. Bu çalışmada yapıların rüzgar yönündeki cevabını belirlemek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Çalışma esas olarak, yerel koordinatların ve zamanın keyfi bir fonksiyonu olan karmaşık rüzgar hızı alanını,

$$V(P,t) = \bar{V}(z) + v(P,t)$$

sadece zamanın keyfi bir fonksiyonu olan,

$$V_{eq}(P,t) = \bar{V}(z) + \sigma_v(z)v_{eq}^*(t) \dots \dots \dots$$

eşdeğer rüzgar alanı ifadesi ile tanımlar. Burada $\bar{V}(z) = z$ yüksekliğindeki P noktasında yer alan ortalama rüzgar hızı, $\sigma_v(z)$ gerçek hız değişimi $v(P,t)$ ' nin standart sapması, $v_{eq}^*(t)$ indirgenmiş eşdeğer hız değişimi fonksiyonudur. Bu fonksiyona dayanarak, rüzgarın dinamik etkisi altında analiz edilecek yapının i . moduna ait eşdeğer modal fiktif rüzgar yükü,

$$f_{ieq}(t) = \rho v_{eq}(t) \int_A C_p(P) \bar{V}(z) \sigma_v(z) \psi_i(z) dA$$

olarak hesaplanır. Burada, $C_p(P)$ ortalama rüzgar basıncı katsayısı, ψ_i ele alınan yapının i . mod şekli, ρ havanın yoğunluğudur.

Bu formülasyondan hareketle çalışmanın daha sonraki bölümlerinde, $v_{eq}^*(t)$ eşdeğer hız değişimine ait spektrum, üç ayrı tip yapı için elde edilmiştir. Bu spektrumların elde edilişinde yapıya ait mod şekilleri fonksiyonlarının, yükseklikle işaretlerinin değişmediği kabul edilmiştir. Yani, elde edilen spektrum ifadeleri, mod şeklinin işaretlerinin yükseklikle değişmesi halinde (Yüksek yapılardaki 2. ve daha yüksek mod şekillerinde olduğu gibi) doğru sonuç vermemektedir. Bu yöntemin darbe faktörü yöntemine göre en önemli üstünlüğü yükün statik değil dinamik olmasıdır. Bu da deplasmanla beraber aynı anda ivme değerlerinin de hesaplanabilmesini sağlamaktadır.

Aynı yazarın daha sonra yayınlanan başka bir makalesinde [33] çok serbestlik dereceli sistemlerde elde edilen modal sonuçların hangi yöntemlerle toplanabileceği konusunda bir inceleme yapılmış, fakat bir önceki makalede formülasyonu verilen spektrum ifadesindeki yüksek modların getirdiği sorunun nasıl çözüleceği konusunda bir açıklama yapılmamıştır.

Yüksek modlarla ilgili problemler rüzgar tuneli testlerinde de karşımıza çıkmaktadır. Genellikle rijit modeller kullanılarak yapılan tunel testlerinde, yüksek yapı modelleri tunel tabanına bir yay ve bir titreşim söndürücü ile bağlanırlar. Modelin kendisi rijit bir malzemeden yapılmıştır. Bu tip bir sistemin mod şekli tektir ve doğrusal formdadır. Bu modelden elde edilen ölçümlerden gerçek yapının modal değerlerine geçmek istendiğinde ilave bir grup analitik işlem yapmak gerekir. Boggs ve Peterka bir çalışmalarında [34] bu konuyu ele almış ve modal düzeltme katsayılarının nasıl hesaplanacağı konusunda bir yöntem önermişlerdir.

BÖLÜM 3

BU ÇALIŞMANIN AMACI

Rüzgar yükleri, yüksek yapıların boyutlandırılmasında gözönünde tutulan belli başlı yüklerden birisidir. Bu yükün dinamik karakterinin, birçok halde statik olandan daha etkin olabildiği ispatlanmıştır. Bu nedenle de dinamik etkisi yük standartlarının yapısına girmiştir. Şu anda standartlarca önerilen ve pratikte kullanılan yöntem eşdeğer statik yük yöntemidir. Bu yöntemde, rüzgarın statik ve dinamik etkilerinin beraberce yapıda oluşturacağı deplasmanı tek başına oluşturabilecek bir eşdeğer statik yük belirlenir ve yapıya bu yüklenir. Bu konuda alışılmış olan yol, statik rüzgar profilini bir darbe katsayısı ile çarpmak ve yapıya o şekilde yüklemektir. Bu yöntem Davenport [31] tarafından önerilmiş olup, darbe faktörü yöntemi olarak bilinir. Bu şekilde yüklenmiş olan bir taşıyıcı sistemin statik analiz sonuçları, yapıların boyutlandırılması amacı için yeterli yaklaşıklıktadır.

Yapıların boyutlandırılmasında, darbe faktörü yönteminin kullanılması halinde, sınırlayıcı kriterler gerilme ve deplasman olmaktadır. Bu durum yükün dinamik etkisini tam olarak hesaba katmamaktadır. Rüzgar gerçekte daha çok dinamik karakterli bir etkidir. Dinamik kuvvetlerle zorlanan yapılarda, deplasmanların yanında ivmeler de ortaya çıkar. Yükün statikleştirilmesi halinde ise, bu etki tamamen yok varsayılmaktadır.

Yüksek yapıların iyi bilinen önemli problemlerinden birisi de konfor faktörüdür. İnsanların biyolojik yapısı, belirli sınırların dışındaki ivme değerlerinde rahatsız olur. Bu durum insanın yapısına ve yaşına göre değişim göstermekle beraber, insanların yaşayacağı ortamlarda izin verilen en yüksek ivme sınırlamaları değişik kaynaklarca belirlenmiştir [35]. Bu ise ivmenin yüksek yapıların projelendirilmesinde oldukça önemli bir sınırlayıcı olması gereğini ortaya koymaktadır.

Kanada standardı hariç, hiçbir yük standardında ivme değerini hesaplamaya yönelik bir yöntem bulunmamaktadır. Bu standartta ise, değişik boyutta yapılar ve değişik çevre pürüzlülüğü özellikleri için yapılmış tunel testlerinden elde edilen en yüksek ivme değerleri, bir tablo halinde verilmiştir. Rüzgarın dinamik etkisi

nedeniyle yapının tepesindeki, iki yöndeki ivme değerleri hesaplanmak istenilen yapının, geometrik özellikleri, doğal frekans ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri ile, verilen tablodaki sekiz tip yapıya ait aynı değerler benzetilerek, hangi yapıdan elde edilen sonuçların kullanılacağı belirlenir. Tabloda üç çevre pürüzlülüğü tipi ve üç değişik rüzgar hızı için sekiz tip yapının iki yöndeki ivme değerleri verilmiştir. Ayrıca bu ölçümlere dayanarak çıkartılmış amprik formüller de bu standartta mevcuttur (1.60), (1.61). Bu ifadeler de tabloda olduğu gibi yapının geometrik özelliklerinin yanında doğal frekans ve sönüm oranı değerlerine de bağlıdır. Ancak yapının mod şekilleri bu yöntemde dikkate alınmamaktadır.

Önceki bölümde tanıtılan çalışmaların sonuçlarına dayanarak, en büyük ivme değerlerini elde etmek için bazı yöntemler önerilmiştir. Simiu ve Scanlan [3] veya Şafak ve Foutch [28] tarafından yapılan çalışmalar buna örnek olabilir. Bununla beraber, bu yöntemler pratikteki mühendisler için, hala çok karmaşık ve uzundur. Solari [32] tarafından geliştirilen eşdeğer rüzgar spektrumu yönteminin bunlara nazaran daha kolay uygulanabilir olduğu söylenebilir. Bir önceki bölümde açıklanmaya çalışılan bu yöntemde, önce fiktif eşdeğer rüzgar spektrumu hesaplanacaktır. İkinci olarak alan integralleri alınarak eşdeğer dinamik rüzgar yüküne geçilecektir. Son olarak bu yük yapıya yüklenecek ve bir dinamik analiz sonucu deplasman ve ivme değerleri tespit edilebilecektir. Bu işlemlerin de çok kolay ve hızlı olduğu söylenemez. Ayrıca yazarın kendisinin de belirttiği gibi, eşdeğer rüzgar spektrumunu hesaplamaya yarayan formülasyon, işaret değiştiren mod şekilleri için -ki bunlar ikinci ve daha yüksek modlardır- doğru değer vermemektedir. Bu da, yöntemin henüz sadece birinci mod için iyi sonuç verdiği anlamına gelir.

Yüksek yapılarda rüzgar yükünün dinamik etkisi altında deplasmanların elde edilmesi sırasında, yüksek modların sonuca katkısının yok denebilecek kadar az olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir [25]. Ancak ivme değerlerin hesabında yüksek modlar %20'ye varan oranlarda sonucu etkilemektedir. Bu nedenle amaç, yüksek yapılarda dinamik rüzgar etkisi altında doğru ivme değerlerini elde etmek olunca, yüksek modların katkısını gözardı etmek mümkün değildir. Bu durum, sonuç olarak; en yüksek deplasman ve ivme değerlerini hesaplama imkanı sağlamakla beraber, aynı zamanda alışılmış analiz yöntemlerine uygun, proje mühendislerince kolayca uygulanabilir, basit bir rüzgar yükü analizi yöntemine ihtiyaç olduğunu ortaya çıkartmaktadır.

Cevap spektrumu metodu yapıların deprem analizinde çok sık kullanılan ve mühendisler tarafından iyi bilinen bir yöntemdir. Yapının, ulaşabildiği en büyük ivme, hız ve deplasmanları bu yöntem sayesinde kolaylıkla elde edilebilir. İlk olarak Newmark [36] tarafından teklif edilmiştir. Bu yöntemle göre, değişik doğal frekans ve sönüm oranlarına sahip tek serbestlik dereceli sistemlerin belli karakterdeki deprem kayıtlarına karşı verecekleri deplasman, hız ve ivme şeklindeki cevapları önceden hesaplanır. Elde edilen sonuçlar ordinat, karşı gelen frekanslar apsis olarak değerlendirilerek, çeşitli sönüm oranlar için spektrum eğrileri hazırlanır. Dinamik cevabı hesaplanmak istenen yapının kütle dağılımı ve mod şekline bağlı olarak belirlenen bir modal katkı faktörü, yapının özelliklerine karşı gelen ve hazırlanmış eğrilerden alınan deplasman, hız veya ivme değerleri ile çarpılarak yapının modal cevabı kolaylıkla hesaplanır. Her mod için bu işlem tekrarlanır. Daha sonra bu modal cevaplar toplanarak yapının sonuç cevabı hesaplanmış olur. Bu yöntem birçok bilgisayar programının içine de ilave edilmiştir.

1980 yılında yayınlanan bir çalışmada, Cavellos-Candau [37] deprem ve rüzgar yükleri arasında, ikisinin de zamana bağlı olarak değişimleri; rüzgarın statik parçası dışında iki yükün fonksiyonunun da sıfır ortalamalı ve normal dağılımlı olarak kabul edilebilmeleri açılarından benzerlikler olduğuna işaret etmiştir. Bu nedenle cevap spektrumu yönteminin yüksek yapılarda, rüzgarın etkilerini hesaplamakta kullanılmaması için hiçbir neden yoktur. Fakat iki yük tipi arasında bazı önemli farklar da vardır. Deprem etkisi sisteme tek bir yerden etkir. Bu yer ise yapının zemine oturduğu temel hizasıdır. Söz konusu deprem ivmesinin bütün katlara eşit olarak yansıdığı kabul edilir. Rüzgarda ise bu durum daha karmaşıktır. Yük, direkt olarak yapının üzerine etkidiğinden, uyguladığı kuvvetler yapının mod şekillerine bağlı hale gelmektedir. Ayrıca etki, yapı koordinatlarına bağlı olarak da değişiklik göstermektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı rüzgar yükleri için modal katkı faktörlerinin formülasyonu daha karmaşık olmaktadır.

Bu çalışmada, rüzgar yüklerinin yüksek yapılar üzerinde oluşturduğu en büyük deplasman ve ivme değerlerinin hesaplanabilmesini sağlayabilmek amacıyla basit bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin başlangıç noktası, deprem analizlerinde halihazırda kullanılmakta olan cevap spektrumu yöntemidir. Bu amaçla değişik rüzgar hızı, yapı frekansı ve sönüm oranı değerleri için spektrum eğrileri hazırlanmıştır. Ayrıca yapının kütlesi ve mod şekline bağlı olarak nodal katkı faktörünün hesaplanabilmesi için gerekli yöntemler geliştirilmiştir.

Daha önce de sözü edildiği gibi, rüzgar tüneli testlerinde kullanılan ve tunel tabanına bir yay ve titreşim söndürücü ile bağlanan rijit modellerin mod şekilleri doğru formundadır. Bu modellerden ölçülen sonuçlardan, gerçek sistem üzerinde oluşması beklenen değerlere geçebilmek için bir geçiş veya düzeltme katsayısı tanımlamak gerekmektedir.

Cevap spektrumu eğrilerinin hazırlanmasında kullanılan referans yapı, birim kütle dağılımına sahip ve mod şekli doğru formundadır. Bu yöntemde, modal katkı faktörü olarak isimlendirilen katsayı, bu özelliklere sahip bir sistemin belirli bir rüzgar yüküne karşı cevabı ile gerçek kütle dağılımlı ve mod şekilli sistemin aynı rüzgar yüküne karşı modal cevabı arasındaki orandır. Bu açıdan bakılırsa, bu katsayı modal düzeltme faktörü olarak da isimlendirilebilir.

Rijit modelle, bu çalışmada kullanılan referans yapının benzerliği sayesinde, gerek rüzgar yönünde, gerekse rüzgara dik yönde, rijit modeller üzerinde yapılan rüzgar tuneli testlerinin sonuçları, bu çalışmada üretilen yöntemle hesaplanacak düzeltme katsayıları ile çarpılarak gerçek sistemin modal sonuçlarına geçmek mümkün olacaktır.

BÖLÜM 4

YÜKSEK YAPILARIN RÜZGAR KUVVETLERİNE KARŞI CEVABI

Bu çalışmada, rüzgar etkisinin deplasman ve ivme spektrumlarının hazırlanması için Simiu [25] tarafından kullanılmış bir yöntemin benzeri kullanılacaktır. Bu bölümü izleyen kısımlarda adı geçen yöntem özetle açıklanacaktır.

Yüksek yapıların üzerine etkiyen, zamana ve yüksekliğe göre değişen $V(z,t)$ rüzgar hızının,

$$V(z,t) = V_o(z) + w(z,t) \dots \dots \dots (4.1)$$

şeklinde iki parçaya ayrılabilceği daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Bu terimlerden birincisi olan $V_o(z)$, sadece yüksekliğe göre değişip, zamandan bağımsızdır. Ortalama rüzgar hızı olarak isimlendirilen bu fonksiyon Bölüm 1.1.2.1 de kuvvet kuralı ve logaritmik kural uyarınca iki alternatif fonksiyon halinde tanımlanmıştır (1.2, 1.3). Bu çalışmada Logaritmik Kural uyarınca tanımlanmış olanı kullanılacaktır.

Diğer terim $w(z,t)$ ise, hızın ortalama rüzgar hızı etrafındaki titreşimleridir. Bunlar rastgele titreşimler olduğundan, zamana bağlı olmaktan çok, içindeki frekans bileşenlerine bağlı olarak, yani spektral yoğunluk fonksiyonlarıyla tanımlanırlar. Bölüm 1.1.2.4.2 de, Davenport ve Simiu tarafından önerilen iki adet spektral yoğunluk fonksiyonundan sözedilmişti. Davenport' un spektral yoğunluk fonksiyonu, sadece frekansa bağlı olarak değişmektedir (1.9). Bu çalışmada da kullanılan ve Simiu tarafından önerilen fonksiyon ise, hem z yüksekliğine, hem de f frekansına bağlıdır. Bu fonksiyon daha karmaşık olmasına rağmen, daha gerçekçi olarak kabul edilmektedir.

4.1. Yapıya Rüzgarın Esiş Yönünde Gelen Rüzgar Kuvvetleri

Rüzgarın, esiş yönüne dik yapı yüzeyi üzerindeki z yükseklikli bir noktaya, zaman bağlı olarak uyguladığı kuvvetlerin toplamı şu şekilde yazılabilir.

$$P(z,t) = \frac{1}{2} \rho C_p(z) (V_o(z) + w(z,t))^2 + \rho C_m(z) B \dot{w}(z,t) \dots \dots \dots (4.2)$$

Burada, $V_o(z)$ ortalama rüzgar hızı, $P(z,t)$ ve $w(z,t)$ rüzgar basıncı ve rüzgar hızının zamana bağlı parçası, $C_m(z)$ kütle katsayısı, ρ havanın yoğunluğu ve B ise rüzgarın esiş yönüne dik yapı genişliğidir. $C_p(z)$ katsayısı ise, rüzgar basınç katsayısı olup, yükseklikle değişimi çok az olduğundan, daha sonra ortalama değeri kullanılacaktır. Bu değer, rüzgarın estiği taraftaki C_w basınç katsayısı ile yapının diğer tarafındaki C_l emme katsayısının toplamıdır.

$$C_p(z) = C_w(z) + C_l(z) \dots \dots \dots (4.3a)$$

Burada sözü edilen ortalama değer,

$$C_D = \frac{1}{BH} \int_0^H \int_0^B C_p(z) dx dz \dots \dots \dots ((4.3b)$$

olarak ifade edilir.

Vickery ve Kao, rüzgar tuneli testlerinde yaptıkları ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda, türbülanslı akım içindeki rijit cisimler için, (4.2) denkleminin son terimi olan kütle teriminin ihmal edilebileceğini göstermişlerdir [38,39]. Benzer sonuçlar, yine rüzgar tuneli testleriyle, Bearman ve Petty' nin yaptıkları çalışmalar sonucunda da elde edilmiştir [40,41].

Bu son terimin atılması ve ilk terimin parantez içindeki ifadesinin açık halde yazılmasıyla (4.2) denklemi şu hale gelir.

$$P(z,t) = \frac{1}{2} \rho C_D V_o^2(z) + \rho C_D V_o(z) w(z,t) + \frac{1}{2} \rho C_D w^2(z,t) \dots \dots \dots (4.4)$$

Bu denklemden son terimin de, ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu deneysel çalışmalarla gösterilmiştir [11,38,42]. [43] No.'lu kaynakta ise, bu

nonlineer terimin ifadenin sonucuna katkısı incelenmiştir. 300m. yüksekliğindeki bir yapıda, yapılan analizlere göre, bu terimin yapının dinamik cevabına katkısı %5, rüzgar yönündeki toplam cevaba katkısı ise %3 olarak bulunmuştur. Bu nedenle bu terim de ihmal edilebilir niteliktedir. Böylece toplam rüzgar kuvveti,

$$P(z,t) = P_o(z) + p(z,t) \quad \dots \dots \dots (4.5)$$

şeklinde yazılırsa, (4.4) ve (4.5) ifadelerinin karşılaştırılmasından,

$$P_o(z) = \frac{1}{2} \rho C_D V_o^2(z) \quad \dots \dots \dots (4.6)$$

$$p(z,t) = \rho C_D V_o(z) w(z,t) \quad \dots \dots \dots (4.7)$$

ifadeleri yazılabilir. Burada $P_o(z)$, yapı üzerine etkiyen ortalama rüzgar basıncını ve $p(z,t)$ bu ortalama değer etrafındaki zamana bağlı değişimi tanımlanmaktadır.

4.2. Statik Etki

Logaritmik kurala göre ortalama rüzgar hızının ifadesi,

$$V_o(z) = V_o(z_r) \frac{\ln(z/z_o)}{\ln(z_r/z_o)} \quad \dots \dots \dots (4.8)$$

şeklinde dir. Burada $V_o(z_r)$, z_r referans yüksekliğindeki rüzgar hızını vermektedir. (1.5) denkleminin içindeki $V_o(z_r)$ değeri dışarı çekilirse,

$$V_o(z_r) = u_* 2.5 \ln(z_r/z_o) \quad \dots \dots \dots (4.9)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifade (4.8) ifadesinin içinde yerine konursa

$$V_o(z) = 2.5 u_* \ln \frac{z}{z_o} \quad \dots \dots \dots (4.10)$$

olur. Burada u_* sürtünme hızı olarak isimlendirilir ve referans hızıyla, pürüzlülük uzunluğu z_o a bağlı bir değerdir. Ortalama rüzgar hızından dolayı, yapı üzerine gelen kuvvet (4.6) ifadesiyle verilmiştir. Yapı genişliği hesaba katılarak bu ifade yeniden yazılırsa,

$$P_o(z) = \frac{1}{2} B \rho C_D V_o^2(z) \dots \dots \dots (4.11)$$

elde edilir. Burada B yapının rüzgara esiş yönüne dik genişliğini ve ρ havanın yoğunluğunu göstermektedir. Bu yük içinde, zamana bağlı herhangi bir ifade olmamasından dolayı statik yük olarak isimlendirilir. Yapının, bu yük altındaki deplasmanı, bilinen herhangi bir statik çözüm yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. İleride, dinamik yükün hesabında ise modal analiz yöntemi kullanılacaktır. Sonuçların değerlendirilmesi sırasında, statik ve dinamik yüklere ait çözüm yöntemlerinin benzer olmaları, sonuçların yorumunu kolaylaştıracağından, burada da modal analiz yöntemine göre çözüm yapılmıştır.

Bir yapının i . moduna hareket denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i(2\pi f_i)\dot{q}_i(t) + (2\pi f_i)^2 q_i(t) = \frac{F_{oi}^*(t)}{M_i^*} \dots \dots \dots (4.12)$$

Burada, ζ_i ve f_i sırasıyla sistemin i . moduna ait sönüm oranı ve frekans değerleridir. $F_{oi}^*(z)$ ve M_i^* ise, yine sırasıyla i . moda ait genelleştirilmiş kuvvet ve genelleştirilmiş kütle olup, yüksekliği boyunca sürekli kütle ve rijitlik dağılımına sahip yapılar için ifadeleri aşağıda çıkartılmıştır.

$$F_o^*(z) = B \int_0^H \mu(z) P_o(z) dz \dots \dots \dots (4.13)$$

$$M^* = m \int_0^H \mu^2(z) dz \dots \dots \dots (4.14)$$

Bu ifadedeki m , yapı yüksekliği boyunca üniform olduğu kabul edilen kütle değeri $\mu_i(z)$ ise i . moda ait mod şekli fonksiyonudur. Böyle bir sistemin $y(z)$ yanıl deplasmanı için

$$y(z,t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(z) q_i(t) \dots \dots \dots (4.15)$$

yazılabilir. (4.12) ve (4.15) denklemlerinde geçen $q_i(t)$ i . moda ait zamana bağlı bir fonksiyondur. Bu terime i . moda ait genelleştirilmiş koordinat ismi verilmektedir.

$F_o^*(z)$ genelleştirilmiş kuvveti statik karakterlidir. Bu nedenle $q_i(t)$ fonksiyonunun, zamana bağlı 1. ve 2. türevleri, yani hız ve ivme değerleri sıfırdır. Böylece, (4.12) denkleminin ilk iki terimi sıfır olduğundan, denklem statik yükler için,

$$(2\pi f_i)^2 q_i(t) = \frac{F_{oi}^*(z)}{M_i^*} \dots \dots \dots (4.16)$$

halini alır. (4.13) ve (4.14) denklemleri, (4.16) da yerine konur ve $q_i(t)$ eşitliğin sol tarafında yalnız bırakılırsa,

$$q_i(t) = \frac{B \int_0^H \mu_i(z) P_o(z) dz}{(2\pi f_i)^2 m \int_0^H \mu_i^2(z) dz} \dots \dots \dots (4.17)$$

yazılabilir. Bu ifade, (4.11) denklemiyle beraber (4.15) de yerine konursa, sonuç statik modal deplasman ifadesi tek bir formül halinde yazılabilir.

$$y_i(z) = \mu_i(z) \frac{B \rho C_D \int_0^H \mu_i(z_1) V_o^2(z_1) dz_1}{8\pi^2 f_i^2 m \int_0^H \mu_i^2(z_1) dz_1} \dots \dots \dots (4.18)$$

Bu denklemdeki H , yapı yüksekliğidir. z noktasındaki gerçek deplasman, (4.15) ifadesi uyarınca, sistemin sonsuz adet moduna ait $y_i(z)$ modal deplasmanlarını toplayarak elde edilir. Dinamik sistemlerde olduğu gibi, yüksek modların toplam deplasmana etkisi mod numarası yükseldikçe düşmektedir.

4.3. Dinamik Etki

Rüzgar hızının yapı üzerinde yarattığı zamana bağlı basınç etkisine ait denklem (4.7)' de verilmiştir. Yapının cevabını hesaplamaya geçmeden önce, ilk olarak bu basıncın yapı üzerinde oluşturacağı kuvvetin hesaplanması gerekir. Sürekli sistemler için, i . moda ait genelleştirilmiş kuvvet,

$$F_i^*(t) = \frac{1}{M_i} \int \int_A \mu_i(z) \rho C_D V_o(z) w(x,z,t) dx dz \dots \dots \dots (4.19)$$

olarak yazılabilir. Burada $\mu_i(z)$ sürekli yapıdaki i . mod şekil fonksiyonu, M_i^* ise, yine sürekli formdaki modal kütle olup $M_i^* = m \int_0^H \mu_i^2(z) dz$ olarak yazılabilir.

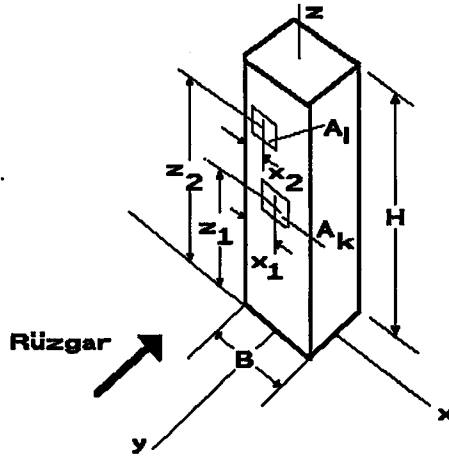
Bu durumda m , yapının yüksekliğince üniform yayılı kütle değeridir. $w(x,z,t)$ fonksiyonu rastgele karakterde olduğundan, genelleştirilmiş kuvvet $F_i^*(t)$ de rastgele karakterde bir fonksiyondur. Şekil 4-1 de görülen, yapının rüzgarın esiş yönüne dik yüzeyi üzerindeki, A_k ve A_l alanlarına sahip bölgelerin merkezlerine etkiyen genelleştirilmiş fiktif kuvvet parçaları,

$$F_{ik}^*(t) = \frac{1}{M_i} \int \int_{A_k} \mu_i(z) \rho C_D V_o(z) w(x,z,t) dx dz \dots \dots \dots (4.20)$$

$$F_{il}^*(t) = \frac{1}{M_i} \int \int_{A_l} \mu_i(z) \rho C_D V_o(z) w(x,z,t) dx dz \dots \dots \dots (4.21)$$

şeklinde olup, bunlar arasındaki çapraz spektral yoğunluk fonksiyonu ise,

$$S_{F_i^*}(f) = \frac{\rho^2}{M_i^2} \int \int_{A_k} \int \int_{A_l} \mu_i(z_1) \mu_i(z_2) C_D^2 V_o(z_1) V_o(z_2) S_w(x_1, z_1, x_2, z_2, f) dx_1 dz_1 dx_2 dz_2 \dots \dots \dots (4.22)$$



Şekil 4-1. Rüzgar etkisindeki bir yüksek yapının boyutları.

olarak yazılabilir. Burada $S_w(x_1, z_1, x_2, z_2, f)$ rüzgar hızının zamana bağlı parçasının A_k ve A_l alanları arasındaki çapraz spektral yoğunluk fonksiyonudur ve şu şekilde yazılır.

$$S_w(x_1, z_1, x_2, z_2, f) = S_w^{1/2}(z_1, f) S_w^{1/2}(z_2, f) Coh((x_1, z_1, x_2, z_2, f) N_u(x_1, z_1, x_2, z_2, f) \dots (4.23)$$

Burada $S_w(z, f)$ zamana bağlı rüzgar hızına ait spektral yoğunluk fonksiyonudur. x_1, z_1 ve x_2, z_2 sırasıyla yapının rüzgarın esiş yönüne dik yüzeyindeki A_k ve A_l alanlarının orta noktalarının koordinatlarıdır. $Coh(x_1, z_1, x_2, z_2, f)$, A_j ve A_k alanları arasındaki frekansa bağlı ilişkiyi gösteren koherins (coherence) fonksiyonu olup, rüzgar cevap spektrumlarının hazırlanmasında bu fonksiyon için (1.14) denklemi ile verilmiş olan Vickery' nin ifadeleri kullanılmıştır [11].

$$Coh(x_1, z_1, x_2, z_2, f) = \exp \left[-2f \frac{[C_x^2(x_1 - x_2) + C_z^2(z_1 - z_2)]^{1/2}}{V_o(z_1) + V_o(z_2)} \right] \dots (4.24)$$

Aynı referansta C_x ve C_z üstel azaltma katsayıları için, $C_x = 16$ ve $C_z = 10$ değerleri önerilmiştir.

N_u fonksiyonu ise, yapının rüzgarın esiş yönüne dik yüzeylerinden, rüzgar tarafındaki ile arka taraftaki üzerinde yer alan noktalar arasındaki ilişkiyi gösteren başka bir koherins fonksiyonudur. x_1, z_1 ve x_2, z_2 şeklindeki orta noktalarının koordinatlarıyla tanımlanan A_k, A_l alanlarından ikisi de rüzgar tarafındaki yüzey üzerinde ise $N_u = 1$ olur. Aksi halde $N_u(P_{1w}, P_{2l}, f) < 1$ olur. Buradaki, w ve l indisleri, bu noktaların sırasıyla, rüzgar yönünde ve arka tarafta olduğunu gösterir. Lam Put [44], Van Koten [45] ve Kao [39] gibi araştırmacılar, bu fonksiyonun çok küçük frekanslar için sıfıra oldukça yakın değerler verdiğini belirtmişlerdir. Yakın zamanlarda Holmes [46], gerçek yapılar üzerinde yaptığı ölçümler sonucu bu ifadeyi şu şekilde tanımlamıştır.

$$N_u(P_{1w}, P_{2l}, f) = \frac{1}{\xi} - \frac{1}{2\xi^2} (1 - e^{-2\xi}) \dots (4.25a)$$

Burada,

$$\xi = \frac{3.85f\Delta x}{\bar{U}} \dots \dots \dots (4.25b)$$

$$\bar{U} = 2,5 u_* \left(\ln \frac{H-z_d}{z_0} - 1 \right) \dots \dots \dots (4.25c)$$

Δx ise 4H, 4B veya 4D değerlerinden en ufak olanıdır. Burada; H, B ve D sırasıyla yapının yüksekliği, genişliği ve derinliğidir. z_d ise sıfır düzlemi deplasmanı olarak isimlendirilir. Bu değer daha gayrimüsaıt tarafta kalmak üzere, genellikle sıfır olarak alınır. Geniş şehir merkezlerinde, etraftaki yapıların ortalama yüksekliği $\bar{h}$ ise, z_d için 20m. veya $0.75\bar{h}$ değerlerinden daha küçük olanının alınabileceği kabul edilmektedir.

Denklem (4.22) deki çapraz spektral yoğunluk fonksiyonu, yapının sadece rüzgarın esiş yönüne dik yüzeyi üzerindeki noktaları için yazılmış tır. Bu durumda (4.23) formülündeki $N_u = 1$ olacaktır. Dolayısıyla yok sayılabilir. Fakat (4.22) denklemindeki C_D^2 rüzgar basınç katsayısının ifadesi açık olarak yazılırsa, ikinci teriminin yapının rüzgar tarafındaki ve rüzgara ters taraftaki yüzleri arasındaki korelasyon ile ilgili olduğu görülür.

$$C_D^2 = (C_w + C_l)^2 = C_w^2 + 2C_w C_l + C_l^2$$

Bu nedenle de, bu terimin N_u katsayısı ile çarpılması gerekir. Böylece dinamik rüzgar yükleri için C_D^2 , şu şekilde hesaplanacaktır.

$$C_D^2 = C_w^2 + N_u(f) 2C_w C_l + C_l^2 \dots \dots \dots (4.26)$$

4.4. Rüzgar Yönünde Deplasman ve İvmenin Hesaplanması

Lineer elastik bir yapının N_1 noktasına, sıfır ortalamalı, normal dağılımlı bir yanal $F_{N_1}(t)$ rastgele yükü etkidiğini varsayalım. Bunun spektral yoğunluk fonksiyonu, $S_{F_N}(f)$ şeklinde olacaktır. Bu durumda, yapının aynı noktasına ait zamana bağlı yanal deplasmanın spektral yoğunluk fonksiyonu şöyle yazılabilir.

$$S_y(z, f) = H^*(z, N_1, f) H(z, N_1, f) S_{F_N}(f) \dots \dots \dots (4.27)$$

Burada $H(z, N_1, f)$ fonksiyonu, Bölüm 1.4.1.1. de açıklanan transfer fonksiyonudur. Bu fonksiyon aslında yapının $F(t) = e^{i2\pi f t}$ şeklindeki yanal bir yüke yanal deplasman cevabıdır. $H^*(z, N_1, f)$ ise $H(z, N_1, f)$ kompleks fonksiyonunun eşleniğidir.

$$F(N_1, t) = e^{i2\pi f t}$$

şeklindeki bir kuvvete karşı yapının toplam yanal deplasman cevabı,

$$y(z, t) = \sum_i \mu_i(z) q_i(t)$$

olarak düşünülürse, H fonksiyonu şu şekilde yazılır.

$$H(z, N_1, f) = \sum_i \frac{\mu_i(z)}{4\pi^2 (1 - f^2/f_i^2 + i\zeta_i f/f_i)} \dots \dots \dots (4.28)$$

Burada, $\mu_i(z)$, f_i ve q_i sırasıyla i . moda ait mod şekil fonksiyonu, doğal frekans ve genelleştirilmiş koordinat değerleridir. f ise yapıya N_1 noktasından etkiyen, zamana bağlı yükün frekansıdır.

Eğer yapıya yukarıda anlatılan tipte, fakat N_1 ve N_2 gibi iki ayrı noktadan rastgele karekterde yanal kuvvetler etkiyorsa, yapının yanal deplasmanının spektral yoğunluk fonksiyonu; sadece ayrı ayrı bu yüklerin spektral yoğunluklarına değil, ayrıca iki nokta arasındaki çapraz spektral yoğunluğa da bağlıdır.

$$\begin{aligned} S_y(z, f) = & H^*(z, N_1, f) H(z, N_1, f) S_{F_{N_1}}(f) + H^*(z, N_2, f) H(z, N_2, f) S_{F_{N_2}}(f) \\ & + H^*(z, N_1, f) H(z, N_2, f) S_{F_{N_1} F_{N_2}}(f) \\ & + H^*(z, N_2, f) H(z, N_1, f) S_{F_{N_1} F_{N_2}}(f) \dots \dots \dots (4.29) \end{aligned}$$

Eğer sözkonusu rastgele yük, yapının rüzgarın esiş yönüne dik yüzeyi üzerindeki bir A alanı üzerine yayılı kabul edilirse bu durumda (4.29) ifadesi genelleştirilebilir.

$$S_{yi}(z,f) = \frac{\mu_i^2(z)\rho^2}{16\pi^4 M_i^2} H_i(f) C_D^2 \int_{z_2} \int_{z_1} \int_{x_2} \int_{x_1} \mu_i(z_1) \mu_i(z_2) V_o(z_1) V_o(z_2) \\ S_w(x_1, z_1, x_2, z_2, f) dx_1 dx_2 dz_1 dz_2 \dots \dots \dots (4.35)$$

ifadesini elde ederiz. S_w ifadesinin formu (4.23) ve (4.24) de verilmiştir. (4.24) denklemini incelenecek olursa, yatay yöndeki x_1, x_2 parametrelerinin sadece burada bulunduğu ve $x_1 - x_2$ şeklinde kullanıldığı görülebilir. $s = x_1 - x_2$ olarak seçilen, yardımcı s parametresi sayesinde, dört katlı olan integral üç katlı hale gelir.

$$S_{yi}(z,f) = \frac{\mu_i^2(z)\rho^2}{16\pi^4 M_i^2} H_i(f) C_D^2 \int_t \int_{z_2} \int_{z_1} \mu_i(z_1) \mu_i(z_2) V_o(z_1) V_o(z_2) \\ S_w(z_1, z_2, s, f) dz_1 dz_2 ds \dots \dots \dots (4.36)$$

Bu ifadede yer alan C_D^2 katsayısı için, (4.26) da verilen ifade kullanılacaktır.

Bu şekilde elde edilen, deplasmana ait spektral yoğunluk fonksiyonunun, f frekansına göre sıfırdan sonsuza kadar integralinin alınması, dinamik deplasmanın kareleri ortalamasını verecektir. Bu değer in karekökünü $\sigma(z)$ ile gösterdiğimizize göre, deplasmanın RMS (kareleri ortalamasının karekökü) değerini şu şekilde yazabiliriz.

$$\sigma_y(z) = \sqrt{\sum_i \int_0^\infty S_{yi}(z,f) df} \dots \dots \dots (4.37)$$

Belirli bir t zamanı içinde yapının en büyük deplasman cevabı,

$$\max y(z) = y_o(z) + g_y(z) \sigma_y(z) \dots \dots \dots (4.38)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $y_o(z)$, statik rüzgar yükü nedeniyle oluşan deplasmandır. $g_y(z)$ ise, pik veya darbe faktörü olarak isimlendirilir. Bu değer Davenport tarafından verilen aşağıdaki ifadeyle yaklaşık olarak tanımlanmıştır [48].

$$g_y(z) = \sqrt{2 \ln \nu_y(z) T} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln \nu_y(z) T}} \dots \dots \dots (4.39)$$

$\nu(z)$ değeri, birim zamandaki, $y(z)$ cevabı içinde yer alan piklerin ortalama sayısıdır. T pik hesaplamları için dikkate alınan etki süresidir. Genellikle $T=3600$ sn olarak alınır. $\nu(z)$, spektral yoğunluk fonksiyonu terimlerinden yararlanarak, aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$\nu_y^2(z) = \frac{\int_0^\infty f^2 S_y(z, f) df}{\int_0^\infty S_y(z, f) df} \dots \dots \dots (4.40)$$

İvme değerleri, deplasmanın ikinci türevi alınarak hesaplanabilir. İvmeye ait spektral yoğunluk, deplasmana ait spektral yoğunluk fonksiyonu cinsinden şu şekilde yazılabilir.

$$S_a(z, f) = (2\pi f)^4 S_y(z, f) \dots \dots \dots (4.41)$$

İvmenin RMS değeri de deplasmanınkine benzer şekilde yazılabilir.

$$\sigma_a(z) = \sqrt{\sum_i \int_0^\infty S_a(z, f) dF} \dots \dots \dots (4.42)$$

yapı üzerinde z yüksekliğindeki en büyük yanal ivme değeri

$$\max a(z, t) = g_a \sigma_a(z) \dots \dots \dots (4.43)$$

şeklinde hesaplanabilir. Statik yük nedeniyle, herhangi bir ivme oluşmayacağı açıktır. g_a pik faktörü hesabı (4.39) denkleminin aynısıdır.

$$g_a(z) = \sqrt{2 \ln \nu_a(z) T} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln \nu_a(z) T}} \dots \dots \dots (4.44)$$

Benzer şekilde,

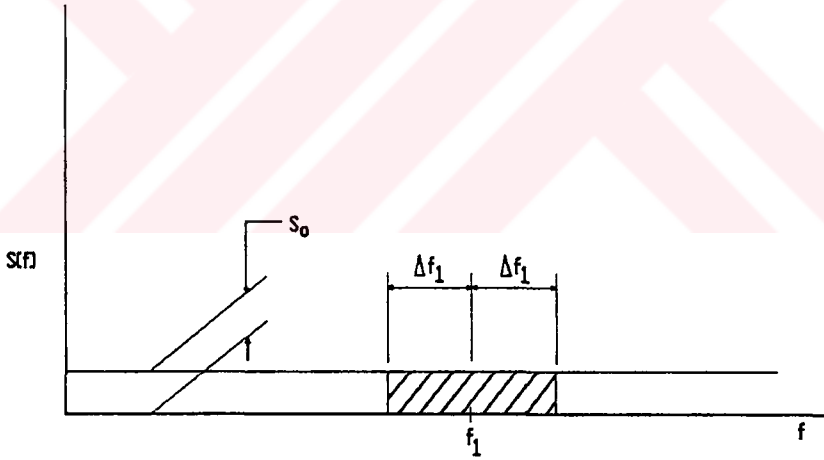
$$v_a^2(z) = \frac{\int_0^\infty f^2 S_a(z,f) df}{\int_0^\infty S_a(z,f) df} \dots\dots\dots (4.45)$$

olarak tanımlanmaktadır.

4.5. Yapının Dinamik Cevabının Arka-Plan ve Rezonans Parçaları

Doğal frekansı f_1 ve sönüm oranı ξ_1 olan lineer elastik, tek serbestlik dereceli bir sistem ele alalım. Bu sistemin, $S(f)$ spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 4-2 deki gibi olan bir dış kuvvetle zorlandığı kabul edilsin.

$$S(f) = S_o \quad n=0 \dots\dots\dots (4.46)$$



Şekil 4-2. Beyaz gürültünün spektral yoğunluk fonksiyonu.

Burada S_o , sabit bir değer olursa, cevabın kareleri ortalaması (RMS) şu şekilde yazılır.

$$\overline{\sigma_y^2} = S_o \int_0^\infty |H(f)|^2 df \dots\dots\dots (4.47)$$

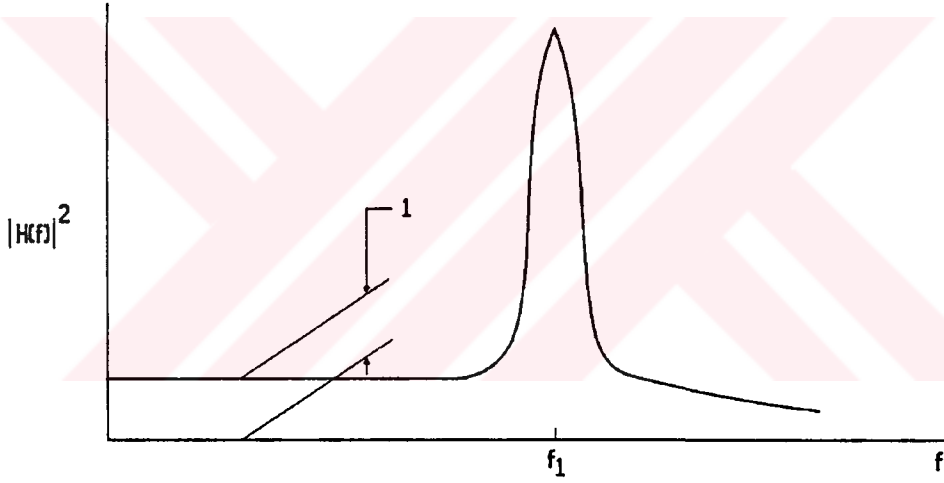
Burada,

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{[1 - (f/f_1)^2]^2 + [2\xi_1 f/f_1]^2} \dots \dots \dots (4.48)$$

olarak önceden tanımlanmıştı.

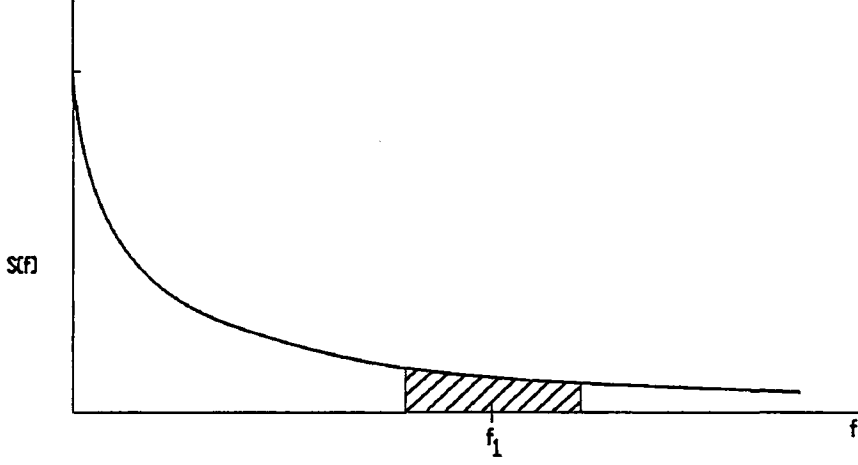
Şekil 4-3 de gösterilmiş olan $|H(f)|^2$ analitik bir fonksiyondur. (4.17) denklemindeki integral, Kaynak [49] sayfa 501 de rezüdü teoremi yardımıyla çözülmüş, sonuç şu şekilde verilmiştir.

$$\overline{\sigma}_y^2 = \frac{\pi f_1}{4\xi_1} S_o \dots \dots \dots (4.49)$$



Şekil 4-3. Yapının modal mekanik transfer fonksiyonunun modülünün karesi

Eğer sönüm oranı ξ_1 küçükse, Şekil 4-3 daki sivri kısım daralır. Bu durum, $\overline{\sigma}_y^2$ nin toplam değerine olan katkının büyük kısmının, zorlayıcı kuvvetin frekansının $f_1 - \Delta f_1 < f < f_1 + \Delta f_1$ arasında olduğu sırada gerçekleşmesi sonucunu doğurur. Bu halde $\Delta f_1/f_1$ küçük bir değerdir ve Şekil 4-4 de taranarak gösterilmiştir.



Şekil 4-4. Azalan spektral yoğunluk fonksiyonu eğrisi

Gerçek atmosferik türbülansı ifade eden spektral yoğunluk fonksiyonu, Şekil 4-4 deki gibi, küçük frekanslarda bir tepe noktası olan fakat genel olarak, f frekans değeri arttıkça azalan bir fonksiyondur. Bu gerçek durumda $\overline{\sigma_y^2}$ değeri üç parçanın toplamı şeklinde yazılabilir.

$$\overline{\sigma_y^2} = (\overline{\sigma_y^2})_1 + (\overline{\sigma_y^2})_2 + (\overline{\sigma_y^2})_3 \dots \dots \dots (4.50)$$

Bu parçalar ayrı ayrı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(\overline{\sigma_y^2})_1 = \int_0^{f_1 - \Delta f_1} S(f) |H(f)|^2 df \dots \dots \dots (4.51)$$

$$(\overline{\sigma_y^2})_2 = \int_{f_1 + \Delta f_1}^{f_1 - \Delta f_1} S(f) |H(f)|^2 df \dots \dots \dots (4.52)$$

$$(\overline{\sigma_y^2})_3 = \int_{f_1 + \Delta f_1}^{\infty} S(f) |H(f)|^2 df \dots \dots \dots (4.53)$$

ξ_1 sönüm oranının küçük olduğu kabulüyle, Şekil 4-4' de taranarak gösterilen ikinci bölgede ($f_1 - \Delta f_1$, $f_1 + \Delta f_1$ arası) $S(f)$ spektral yoğunluk fonksiyonu sabit olarak kabul edilebilir.

$$(\overline{\sigma_y})_2 = \frac{\pi f_1}{4\xi_1} S(f_1) \dots\dots\dots (4.54)$$

Birinci bölgede $(0, f_1 - \Delta f_1 \text{ arası}) |H(f)|^2 \approx 1$ dir. Üçüncü bölgede ise $(f_1 - \Delta f_1, \infty \text{ arası})$, $(\overline{\sigma_y})_3$ değeri ihmal edilebilecek kadar küçüktür [3]. Bu nedenle, birinci ve üçüncü bölgelere ait integral sınırları birleştirilerek, bu integraller tek bir integral olarak hesaplanacaktır. Bu birleştirme nedeniyle sonuçta bulunacak fark Δf_1 in küçük olması yüzünden önemli olmayan bir seviyededir.

$$\overline{\sigma_y} = \int_0^\infty S(f) df + \frac{\pi f_1}{4\xi_1} S(f_1) \dots\dots\dots (4.55)$$

Buradaki birinci ve ikinci terimler, sırasıyla arka-plan parçası (background part) ve rezonans parçası (rezonant part) olarak bilinir. [25]'de, bu yaklaşımın doğruluğunu denemek üzere, değişik karakterdeki yapılar ve değişik çevre özellik-leri için bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, aynı kaynakta verilen bir bilgisayar programı ile 120 civarında çözüm yapılmıştır. Sonuç olarak, bu yaklaşımın hatasının %1 civarında kaldığı gözlenmiştir. Aynı zamanda, bu çalışmada, ivme ve pik faktör hesaplamaları sırasında kullanılan

$$I_L = \int_0^\infty f^{2L} S_y(f) df \quad (L=1,2,3) \dots\dots\dots (4.56)$$

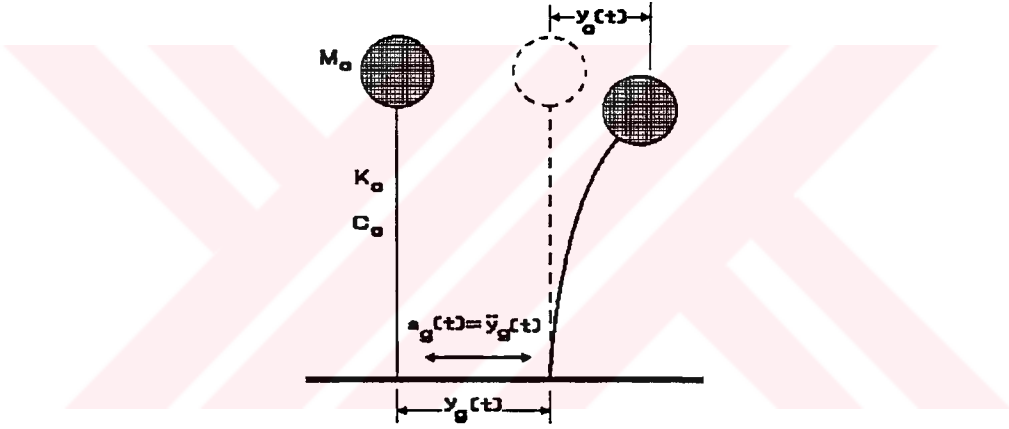
tipindeki integrallerde, arka-plan parçası sonuçlarının ihmal edilebileceği ve integ-ralin şu şekilde yazılabileceği ortaya çıkmıştır.

$$I_L = f^{2L} \frac{\pi f_1}{4\xi_1} S(f_1) \dots\dots\dots (4.57)$$

BÖLÜM 5

DEPREM ANALİZİNDE KULLANILAN SPEKTRUM YÖNTEMİ

Deprem spektrumları, Şekil 5-1 de görülen, değişik doğal frekans ve sönüm oranı değerlerine sahip, tek serbestlik dereceli, konsol bir sistemin, deprem etkisiyle yaptığı deplasmanların pik değerlerinin frekansa göre değişimini gösteren eğrilerdir.



Şekil 5-1. Yerçekimi ivmesi etkisinde, sönümlü ve tek serbestlik dereceli bir sistem.

Deprem etkisinin bir ifade şekli de, sistemin bağlı olduğu zeminin belirli bir ivme ile hareket etmesidir. Böyle bir tek serbestlik dereceli sistemde, atalet, sönüm ve elastik kuvvetler denge halindedir ve toplamaları sıfıra eşitlenebilir.

$$m[\ddot{y}_o(t) + a_g(t)] + m 2\xi_o(2\pi f_o)\dot{y}_o(t) + m (2\pi f_o)^2 y_o(t) = 0 \quad (5.1)$$

Burada $y_o(t)$, sistemin yere göre rölatif deplasmanıdır. Birinci terimin içindeki, yer ivmesine ait kısmı eşitliğin sağ tarafına alarak, denklemi yeniden düzenlersek şu hale gelir.

$$m\ddot{y}_o(t) + m2\xi_o(2\pi f_o)\dot{y}_o(t) + m(2\pi f_o)^2 y_o(t) = -ma_g(t) \dots \dots \dots (5.2)$$

Bu denklem, deprem nedeniyle oluşan yer hareketinin, sisteme etkiyen, eşdeğer bir yük olarak alınabileceğini göstermektedir.

$$F_o(t) = -ma_g(t) \dots \dots \dots (5.3)$$

(1.30) Denklemiyle verilmiş olan Duhamel integralini kullanarak, yere göre deplasman ifadesini yazabiliriz.

$$y_o(t) = -\frac{1}{2\pi f_{od}} \int_{\tau=0}^t a_g(\tau) h_o(t-\tau) d\tau \dots \dots \dots (5.4)$$

Burada, $h_o(t-\tau)$ ve f_{od} ifadeleri (1.31) denklemiyle verilmiştir. Bu durumda deplasman spektral yoğunluk fonksiyonu, şu formülle tanımlanır.

$$D(f_o) = \max_t y_o(t) \dots \dots \dots (5.5)$$

f_o doğal frekansı değerlerine bağlı olan bu, $D(f_o)$ fonksiyonuna ait eğri, deplasman spektrumu olarak isimlendirilir. Sistemin cevabı, farklı sönüm oranlarına ve farklı deprem etkilerine bağlı olarak değişir. Bunların herbiri için farklı spektral eğriler söz konusudur.

Deprem ivmesi nedeniyle oluşan eşdeğer dış kuvvet, ayrık bir sistem olarak modellenmiş çok katlı yapılar için de benzer şekilde ifade edilebilir. Her kata etkiyen kuvvet, o katın kütle değeri ile yer ivmesinin çarpımıdır.

$$\{F(t)\} = -[M]\{I\}a_g(t) \dots \dots \dots (5.6)$$

Burada $\{I\}$, n -boyutlu birim vektördür. (1.49) denkleminden, genelleştirilmiş kuvvet şu şekilde hesaplanabilir.

$$F_i^*(t) = -\mu_i^T M I a_g(t) = \lambda_i a_g(t) \dots \dots \dots (5.7)$$

$$\lambda_i = -\mu_i^T M I$$

Burada λ_i , i . modun toplam yüke katkısını gösteren bir katsayıdır. (1.30) ve (5.7) denklemlerine dayanarak, i . moda ait $q_i(t)$ deplasman ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$q_i(t) = \frac{\lambda_i}{M_i^*} \frac{1}{2\pi f_{oi}} \int_{\tau=0}^t a_g(\tau) h_i(t-\tau) d\tau \dots \dots \dots (5.8)$$

(5.8) ve (5.4) denklemleri birbirleriyle karşılaştırılacak olursa, (5.8) denkleminin sağ tarafının tek serbestlik dereceli sisteminkiyle aynı olduğu görülür. Fark, sadece (5.8) denkleminin ilk terimi olan λ_i / M_i^* ifadesidir. Bu durumda, çok katlı bir sistemin i . moduna ait maksimum deplasmanı, tek serbestlik dereceli sisteminki cinsinden ifade etmek istersek şu ifadeyi yazabiliriz.

$$\max_t q_i(t) = \frac{\lambda_i}{M_i^*} \max_t y_o(t) = \frac{\lambda_i}{M_i^*} D(f_{oi}) \dots \dots \dots (5.9)$$

$D(f_{oi})$ değeri, spektrum eğrileri içinden, çok katlı sistemin i . moduna ait ζ_{oi} sönüm oranı ve f_{oi} doğal frekansına karşı gelen değer olarak seçilecektir. Her mod için bu işlem tekrarlanacak ve maksimum modal değerler hesaplanacaktır. Modal değerlerin toplamı, gerçek maksimum deplasman veya ivme değildir. Fakat gerçek değer, bu toplamdan küçüktür. Çünkü, her moda ait piklerin oluşumu, aynı zamanda gerçekleşmez. Doğru değere yaklaşmak için değişik toplam alma yöntemleri vardır. Bu modal sonuçların, karelerinin toplamının karekökü alınarak toplam cevabın hesaplanması, en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir.

BÖLÜM 6

RÜZGAR ANALİZİNDE KULLANILMAK ÜZERE MODAL KATKI FAKTÖRÜNÜN HESABI

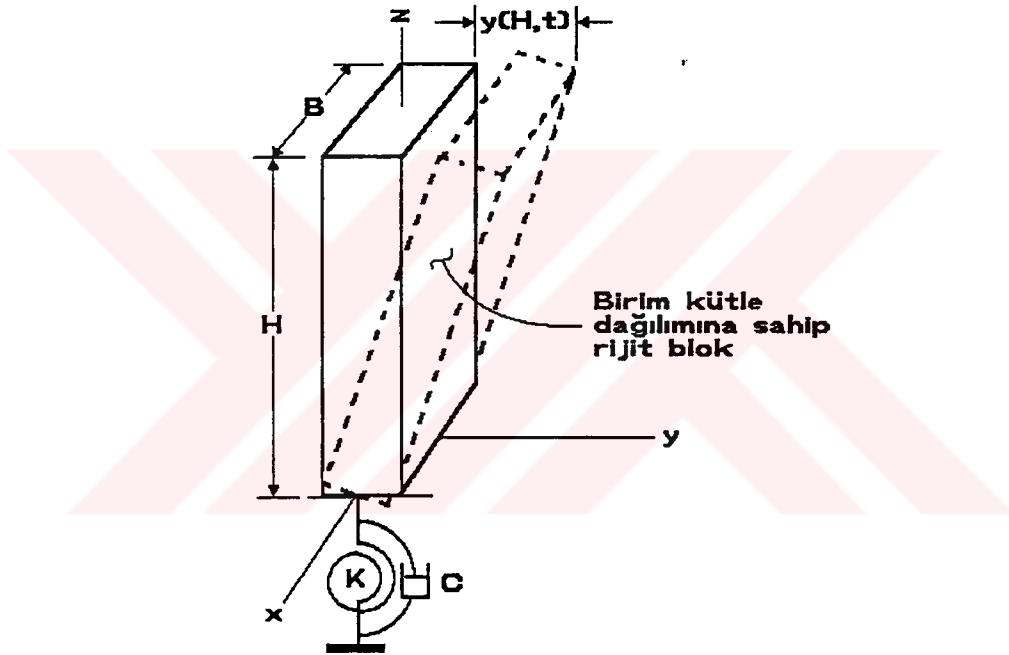
Aynı deprem yüklerinde olduğu gibi, rüzgar yükleri için de yapıların cevap spektrumları hazırlanabilir. Ancak bu çalışma, rüzgar yükleri ile deprem yüklerinin karakterleri ve yapıya etki şekilleri arasındaki farklılıklar nedeniyle daha zordur. Deprem yükleri, yer ivmesi nedeniyle yapılarda oluşan atalet kuvvetleridir. Bu nedenle, yapının bu yükler altındaki spektral cevabını etkileyen parametreler, yapının sönüm oranı ve doğal frekansıdır. Diğer yapısal parametreler sonuçları etkilemez.

Rüzgar yükleri ise yapıya, deprem gibi yapının zeminle temas ettiği tek bir yerden değil, bütün dış yüzeylerinden etkir. Yapının dış geometrisinin, yani rüzgar alan yüzeyin boyutu ve biçiminin, rüzgar yükünün ve dolayısıyla bu yüke karşı yapının cevabının hesabında, çok önemli etkisi vardır. Ayrıca rüzgarın hız ve türbülans yapısı, çevre pürüzlülüğüne de oldukça bağlıdır. Bu da, spektrum eğrilerinin hazırlanması sırasında, bölge faktörünün bir parametre olarak dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, dikdörtgen biçimindeki bir yapıya dik olarak etkiyen rüzgar hali ve bu nedenle yapıda sadece rüzgarın esiş yönünde oluşan zamana bağlı yanal ivme ve deplasmanlar gözönünde tutulmuştur. Yapının dış geometrisi ise, yükseklik ve ön yüzün genişliği ile tanımlanır. Bir basitleştirme olarak, yüksek binalar için rüzgar basıncının yatay yöndeki değişimi ihmal edilmiş ve basınç katsayısı olarak genişlik üzerindeki ortalama basınç katsayısı kullanılmıştır. Böylece dış geometri sadece yüksekliğe bağımlı hale gelmiş olur. Bu çalışmada rüzgar cevap spektrumları, değişik yapısal sönüm, yükseklik ve yüksekliğin genişliğe oranı parametrelerine göre hazırlanmıştır.

6.1. Rüzgar Spektrumu İçin Referans Sistemin Tanımlanması

Rüzgar cevap spektrumlarının hazırlanabilmesi için, bu çalışmada Şekil 6-1 de şematik olarak gösterilen sistem esas alınmıştır. Bu referans yapı, genişliği, yüksekliği ve kütlesi belirli, rijit bir blok olup, temele bir dönel yay ve titreşim söndürücü ile bağlanmıştır. Bu sistem, mod şekli doğrusal olan tek serbestlik dereceli bir sistemdir. Sönüm oranı, rüzgar hızı, yükseklik ve yükseklik/genişlik parametrelerinin değişik değerleri için bu referans sisteme ait rüzgar cevap spektralları hazırlanmıştır. Bu sistem için, birim yükseklik için birim kütle, yapının bulunduğu bölge için ise, şehir merkezi olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6-1. Cevap spektrumlarının üretilmesinde kullanılan tek serbestlik dereceli referans yapının şematik gösterilimi.

Şekil 6-1 de görülen koordinat sistemini kullanarak, referans sistemin cevabı için şu ifade yazılabilir.

$$y_r(z,t) = \mu_r(z)q_r(t) \quad \dots \dots \dots (6.1)$$

Bu sistemin tek bir modu vardır. Burada $\mu_r(z)$ sistemin bu moduna ait şekil fonksiyonunu göstermektedir. Şekil 6-1 de kesikli çizgili olarak gösterilen bu mod şekli,

$$\mu_r(z) = \frac{z}{H} \dots \dots \dots (6.2)$$

olarak ifade edilir. Bu sisteme ait hareket denklemi,

$$\ddot{q}_r(t) + 2\xi_r(2\pi f_r)\dot{q}_r(t) + (2\pi f_r)^2 q_r(t) = \frac{F_r^*(t)}{M_r^*} \dots \dots \dots (6.3)$$

şeklindedir. Burada, ξ_r, f_r, F_r^* ve M_r^* sırasıyla referans yapının modal sönüm oranı, doğal frekansı ile genelleştirilmiş yük ve kütle değerleridir. Referans sistemin genelleştirilmiş kütle değerini birim yapı yüksekliği için birim kütle kabulü ile şu şekilde hesaplayabiliriz.

$$M_r^* = \int_0^H \mu_r^2(z) \cdot 1 \cdot dz = \int_0^H \left(\frac{z}{H}\right)^2 dz = \frac{H}{3} \dots \dots \dots (6.4)$$

(4.36) Denklemini kullanarak, referans sistemin deplasman cevabına ait $S_{yr}(z, f)$ spektral yoğunluk fonksiyonunu (Power Spectral Density Function) şöyle yazabiliriz:

$$S_{yr}(z, f) = \frac{\mu_r^2(z) \rho^2}{16\pi^4 M_r^2} H_r(f) C_D^2 \int_t \int_{z_2} \int_{z_1} \mu_r(z_1) \mu_r(z_2) V_o(z_1) V_o(z_2) S_w(z_1, z_2, t, f) dz_1 dz_2 dt \dots \dots \dots (6.5)$$

İvme için spektral yoğunluk fonksiyonunu, deplasmana ait spektral yoğunluk fonksiyonu cinsinden yazılırsa,

$$S_{ar}(z, f) = (2\pi f)^4 S_{yr}(z, f) \dots \dots \dots (6.6)$$

elde edilir. Yapının tepesindeki deplasman ve ivmenin RMS değerleri, sırasıyla şöyle yazılabilir:

$$\sigma_{yr}(H) = \left(\int_0^\infty S_{yr}(H, f) df \right)^{1/2} \quad \text{ve} \quad \sigma_{ar}(H) = \left(\int_0^\infty S_{ar}(H, f) df \right)^{1/2} \dots \dots (6.7)$$

Tepe noktasındaki maksimum deplasman ve ivme için ise şunlar yazılabilir.

$$\max_t y_r(H,t) = y_{or}(H) + g_{yr}(H)\sigma_{yr}(H) \dots \dots \dots (6.8)$$

$$\max_t a_r(H,t) = g_{ar}(H)\sigma_{ar}(H) \dots \dots \dots (6.9)$$

Burada $y_{or}(H)$, statik rüzgar yükü nedeniyle oluşan deplasman, $g_{yr}(H)$ ve $g_{ar}(H)$, sırasıyla, referans sistemin tepesindeki deplasman ve ivmeye ait pik faktörlerdir.

Sisteme ait deplasman cevap spektumu hesaplanırken, sadece dinamik deplasman hesaba katılacaktır. Çünkü statik deplasmanın herhangi bir statik analiz yöntemi kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir. Dinamik deplasman cevap spektumu; Şekil 6-1 de verilen referans sistemin maksimum tepe deplasmanının, belirli bir frekans değer aralığı için, frekansa göre çizilmiş olan eğrisi olarak tanımlanabilir. Böylece f_i dogal frekans değeri için, $D(f_i)$ deplasman spektumu şu şekilde yazılır.

$$D(f_i) = \max_t [y_r(H,t)]_{dinamik} = g_{yr}(H)\sigma_{yr}(H) \dots \dots \dots (6.10)$$

Benzer şekilde ivme spektumu için de,

$$A(f_i) = \max_t a_r(H,t) = g_{ar}(H)\sigma_{ar}(H) \dots \dots \dots (6.11)$$

yazılabilir.

6.2. Modal Katkı Faktörünün Saptanması

Bir evvelki bölümde tanımlanan referans yapıya ait cevap spektumundan yararlanarak, verilen bir yapının rüzgar kuvvetlerine karşı cevabını hesaplamak istediğimizde, ilk olarak modal katkı faktörlerinin hesaplanması gerekmektedir. Modal katkı faktörleri, verilen bir sistemin rüzgar etkilerine karşı göstereceği en büyük modal cevabın (deplasman veya ivme), referans sistemin göstereceği cevaba oranı olarak tanımlanabilir.

Verilen bir yapının i . moduna ait dinamik cevabın spektral yoğunluk fonksiyonu (PSDF) $S_{yi}(f)$, (1.52) denkleminde yararlanarak şu şekilde yazılabilir.

$$S_{yi}(z, f) = \mu_i^2(z) |H_i(f)|^2 S_{Fi}^*(f) \dots \dots \dots (6.12)$$

Burada $H_i(f)$, i . moda ait transfer fonksiyonudur ve (1.53) denklemiyle verilmiştir.

$$H_i(f) = \frac{1}{M_i^* \left[-(2\pi f)^2 + i(2\pi f)(2\zeta_{oi})(2\pi f_{oi}) + (2\pi f_{oi})^2 \right]} \dots \dots \dots (6.13)$$

Bu denklemdeki ζ_{oi} ve f_{oi} , sırasıyla verilen yapının i . moduna ait sönüm oranı ve doğal frekans değerleridir. $S_{Fi}^*(f)$, (4.22) denkleminde hesaplanabilir. Benzer şekilde, verilen yapının i . moduna ait frekans ve sönüm oranlarına sahip olan, aynı boyutlardaki referans yapının dinamik cevabının spektral yoğunluk fonksiyonu şu şekilde yazılabilir.

$$S_{yr}(z, f) = \mu_r^2(z) |H_r(f)|^2 S_{Fr}^*(f) \dots \dots \dots (6.14)$$

Referans sistemin, hesaplanmak istenen sistemin i . moduna ait doğal frekans ve sönüm oranına sahip olacak şekilde seçilmesi nedeniyle, bu benzerliği ifade etmek üzere (6.14) ifadesinde r indisinin yanında i indisi de kullanılmıştır. Referans sisteme ait H_{ri} transfer fonksiyonu ile gerçek sistemin i . moduna ait transfer fonksiyonu, bir sabit çarpan dışında aynıdır. Bu sabit çarpan, referans sistemin modal kütlelerinin, gerçek sistemin i . moduna ait modal kütleyle oranına eşittir. Böylece referans sisteme ait H_{ri} transfer fonksiyonu,

$$H_{ri}(f) = \frac{M_r^*}{M_i^*} H_i(f) \dots \dots \dots (6.15)$$

olarak ifade edilir.

Gerçek ve referans sistemlerin, rüzgar etkisi nedeniyle yapmış oldukları dinamik deplasmanların her iki yapının tepesindeki değerleri arasındaki oran $k_{yi}(H)$ ve her iki yapının tepesindeki ivme değerleri arasındaki oran ise $k_{ai}(H)$ ile gösterilirse, bu oranlar için;

$$k_{yi}(H) = \frac{g_{yi}(H) \sigma_{yi}(H)}{g_{yri}(H) \sigma_{yri}(H)} = \frac{g_{yi}(H)}{g_{yri}(H)} \left[\frac{\int_0^\infty S_{yi}(H,f) df}{\int_0^\infty S_{yri}(H,f) df} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (6.16)$$

$$k_{ai}(H) = \frac{g_{ai}(H) \sigma_{ai}(H)}{g_{ari}(H) \sigma_{ari}(H)} = \frac{g_{ai}(H)}{g_{ari}(H)} \left[\frac{\int_0^\infty S_{ai}(H,f) df}{\int_0^\infty S_{ari}(H,f) df} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (6.17)$$

ifadeleri yazılabilir. Bu katsayılar, i . moda ait katkı faktörleri veya modal düzeltme faktörleri olarak isimlendirilecektir. $g_{yi}(H)$ ve $g_{yri}(H)$, gerçek ve referans sistem için tepe deplasmanına ait; $g_{ai}(H)$ ve $g_{ari}(H)$ ise, yine gerçek ve referans sistem için, tepe ivmesine ait pik faktör değerleridir. Bunlara ait ifadeler (4.39), (4.40), (4.44), (4.45) denklemleri ile verilmistir.

(4.22) integral ifadesinden yararlanılarak $S_{Fi}^*(f)$ ve $S_{F_{ir}}^*(f)$ fonksiyonlarının hesaplanması, bu integral ifadesinin içerdiği dört katlı integral nedeniyle oldukça karmaşıktır. Bu nedenle de, (6.16) ve (6.17) denklemleriyle tanımlanan modal düzeltme faktörleri için pratik değeri olan, sade ifadeler üretmek mümkün değildir.

Bu hesabı basitleştirmek amacıyla; yapı üzerine etkiyen rüzgar basıncının, etkidiği yapı yüzeyi üzerindeki korelasyon özelliği esas alınarak iki sınır durum tanımlanır. Adı geçen fonksiyonların gerçek değeri, bu iki sınır için hesaplanan değerler arasında kalır. Bu sınırları belirleyen parametre, ifadelerin içinde yer alan koherans (Coherence) fonksiyonudur. Birinci sınır durumunda, rüzgar etkisindeki yapı yüzeyi üzerinde oluşan rüzgar basıncının etkidikleri yerden bağımsız olduğu (spatially uncorrelated); ikinci sınır durumunda ise, tamamen etkidikleri yere bağımlı olduğu (fully correlated) kabul edilmiştir. Bu durum (6.12) ve (6.14) denklemlerinin incelenmesinden kolayca görülebileceği gibi, (6.16) ve (6.17) de verilen modal düzeltme faktörlerine de aynen yansımaktadır. Bu yüzden, modal düzeltme faktörleri, adı geçen iki sınır durum için kolayca hesaplanabilir ifadelerle tanımlanacaktır.

Bu faktörlerin gerçek değerleri, bu sınır durumlar için verilmiş ifadelerle hesaplanabilecek değerler arasında kalacaktır. Bunlara ilaveten, rüzgar hızına ait

zamana bağlı parçanın spektral yoğunluk fonksiyonunun (Power Spectral Density Function), Davenport' un [1] önerdiği gibi yapının yüksekliğinden bağımsız olduğu kabul edilirse; modal düzeltme faktörlerinin her iki sınır durum için basitleştirilmiş ifadeleri izleyen alt bölümlerde görülebileceği gibi saptanabilir.

6.2.1. I. Sınır Durum : Rüzgar Basınçları Tamamen Koordinatlardan Bağımsız.

Eğer, yapı yüzeyinin koordinatları ile, rüzgarın o noktaya uyguladığı basınç değeri arasında herhangi bir ilişki olmadığını varsayarsak, bu durumda bu ilişkinin belirlendiği koherans fonksiyonu izleyen ifadelerden görülebileceği gibi basitleşir.

$$Coh(x_1, z_1, x_2, z_2) = \delta(x_1 - x_2) \delta(z_1 - z_2) \dots \dots \dots (6.18)$$

Burada δ Dirak fonksiyonu olarak isimlendirilir. Bu fonksiyonun tanımı, şu şekildedir.

$$\delta(x) = \begin{cases} 1; & x = 0 \text{ ise} \\ 0; & x \neq 0 \text{ ise} \end{cases} \dots \dots \dots (6.19)$$

Bu tanımla, $Coh(x_1, z_1, x_2, z_2)$ fonksiyonu, x_1, x_2 ve z_1, z_2 koordinatlarının eşit olduğu hallerde 1 değerini, aksi durumda ise herhangi bir ilişki olmadığını göstermek üzere sıfır değerini alacak bir fonksiyondur. Rüzgar hızına ait spektral yoğunluk fonksiyonunun yapı yüksekliğinden bağımsız olduğu kabulü ile (4.22) denklemi şöyle yazılabilir.

$$S_{F_i}^*(f) = (\rho B)^2 S_w(f) \int_0^H C_D^2 \mu_i^2(z) V_o^2(z) dz \dots \dots \dots (6.20)$$

Bundan yararlanarak gerçek sistemin i . moduna ait tepe deplasmanının spektral yoğunluk fonksiyonu yazılırsa,

$$S_{yi}(H, f) = \mu_i^2(H) (\rho C_D B)^2 |H_i(f)|^2 S_w(f) \int_0^H \mu_i^2(z) V_o^2(z) dz \dots \dots \dots (6.21)$$

olur. Referans sistem için de aynı ifadeyi benzer şekilde yazmak mümkündür.

$$S_{\pi}(H,f) = \mu_r^2(H)(\rho_{CDB})^2 |H_{\pi}(f)|^2 S_w(f) \int_0^H \mu_r^2(z) V_o^2(z) dz \dots\dots (6.22)$$

(4.40) ve (4.45) denklemleriyle verilen deplasman ve ivmeye ait $v_y^2(z)$ ve $v_a^2(z)$ ifadeleri frekans parametreleri üzerine iki integralin oranı şeklindedir. Yukarıda elde edilmiş olan $S_{yi}(H,f)$ ve $S_{yr}(H,f)$ deplasmana ait spektral yoğunluk fonksiyonu ifadeleri içindeki frekansa bağlı terimler, (6.15) denklemi de gözönünde tutularak incelenirse, gerçek ve referans sistemler için aynı olduğu görülür. Bu durum, iki sistem için $v_y^2(z)$ ve $v_a^2(z)$, dolayısıyla $g_y(z)$ ve $g_a(z)$ değerlerinin eşit çıkması sonucunu doğurur.

Böylece, birinci sınır durum için, gerçek ve referans yapıların tepesindeki ($z=H$) toplam dinamik deplasman ve ivmelerin oranı RMS'lerin oranı şeklinde yazılabilir. Oranın altında ve üstündeki ifadelerin içindeki frekansa bağlı parametreler aynı olduğundan birbirini götürür. Bu durum frekansa bağlı integralin de ortadan kalkmasına neden olur.

$$k_{1i}(H) = \frac{\mu_i(H)}{\mu_r(H)} \frac{M_r^*}{M_i^*} \left[\frac{\int_0^H \mu_i^2(z) V_o^2(z) dz}{\int_0^H \mu_r^2(z) V_o^2(z) dz} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (6.23)$$

6.2.2. II.Durum : Basınçlar Tam Olarak Koordinatlara Bağımlı

Yapı üzerine etkiyen basınçların tamamıyla koordinatlara bağımlı olması, koherins fonksiyonunun yerden bağımsız, daima bir olması demektir.

$$Coh(x_1,z_1,x_2,z_2) = 1 \dots\dots\dots (6.24)$$

Bu durumda (4.36) denklemi şu hale gelir.

$$S_{F_r^*}(f) = \rho^2 C_D^2 S_w(f) \int_0^H \int_0^H \int_0^B \mu_r(z_1) \mu_r(z_2) V_o(z_1) V_o(z_2) dz_1 dz_2 ds \dots (6.25)$$

$$S_{F_r^*}(f) = B \rho^2 C_D^2 S_w(f) \int_0^H \mu_r(z_1) V_o(z_1) dz_1 \int_0^H \mu_r(z_2) V_o(z_2) dz_2 \dots (6.26)$$

$$S_{F_r^*}(f) = B \rho^2 C_D^2 S_w(f) \left[\int_0^H \mu_r(z) V_o(z) dz \right]^2 \dots (6.27)$$

Bu formülden yararlanarak, *i*. mod şekline ait deplasman spektral yoğunluk fonksiyonu şöyle yazılabilir.

$$S_{yi}(H, f) = \mu_i^2(H) (\rho C_D B)^2 |H_i(f)|^2 S_w(f) \left[\int_0^H \mu_i(z) V_o(z) dz \right]^2 \dots (6.28)$$

Benzer şekilde, referans sistemi için de deplasmana ait spektral yoğunluk ifadesi şu şekilde yazılır:

$$S_{ri}(H, f) = \mu_r^2(H) (\rho C_D B)^2 |H_r(f)|^2 S_w(f) \left[\int_0^H \mu_r(z) V_o(z) dz \right]^2 \dots (6.29)$$

Bir önceki bölümde olduğu gibi, burada da $S_{yi}(H, f)$ ve $S_{yr}(H, f)$ ifadelerinin içindeki frekansa bağlı terimler, gerçek ve referans sistem için aynıdır. Bu nedenle, iki sisteme ait pik faktörler eşit çıkar. Bu durumda, gerçek sistemin *i*. moduna ait pik cevap ile bu moda karşılık gelen referans sistemin pik cevabı arasındaki oran iki sistemin RMS' leri arasındaki oranı olarak yazılabilir.

$$k_{2i}(H) = \frac{\mu_i(H)}{\mu_r(H)} \frac{M_r^*}{M_i^*} \frac{\int_0^H \mu_i(z) V_o(z) dz}{\int_0^H \mu_r(z) V_o(z) dz} \dots (6.30)$$

Yapının tepesindeki, *i*. moda ait pik cevap, referans sistemin pik cevabı ve katkı faktörlerinin cinsinden hesaplanabilir.

$$\max_t y_i(H,t) = k_i(H) \max_t y_r(H,t) \dots \dots \dots (6.31)$$

Buradaki $\max_t y_r(H,t)$ ifadesini daha önce spektral cevap olarak tanımlamış olduğumuzdan, yapının i . moduna ait cevabı şu şekilde ifade edilebilir.

$$\max_t y_i(H,t) = k_i(H) D(f_{oi}) \dots \dots \dots (6.32)$$

Toplam pik cevap, pik modal cevapların toplamı olarak hesaplanır. Bu toplamı yapmak üzere SRSS (square-root-of-sum-of-squares) metodu tercih edilirse ifade şu şekilde yazılabilir.

$$\max_t y(H,t) = \left[\sum_{i=1}^n \left(\max_t y_i(H,t) \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\sum_{i=1}^n k_i^2(H) D^2(f_{oi}) \right]^{1/2} \dots \dots (6.33)$$

Deplasman için 6.1.2.1 ve 6.1.2.2 de verilen ifadelere benzer ifadeler ivmeler için de elde edilebilir. Deplasmanla ivme arasındaki ilişki sadece frekansın bir fonksiyonudur. Ancak iki uç durum için de, basitleştirilen spektral yoğunluk fonksiyonu ifadelerinde, frekansa bağlı terimler sadeleştirilmeler sırasında yok olmakta ve bu nedenle deplasman ve ivme için aynı sonuçlar elde edilmektedir. Deplasman için hesaplanmış olan k_{1i} ve k_{2i} ifadeleri, ivme için de geçerlidir. Bu durumda, yapının tepesindeki i . moda ait pik ivme değeri, $\max_t a_i(H,t)$ referans sistem pik ivmesi cinsinden yazılmak istenirse,

$$\max_t a_i(H,t) = k_i(H) A(f_{oi}) \dots \dots \dots (6.34)$$

olur. Toplam pik ivme değeri (6.33) denklemindeki gibi modal ivmelerin uygun şekilde toplanmasıyla elde edilir.

Verilen bir yapı için gerçek $k_i(z)$ değeri $k_{1i}(z)$ ve $k_{2i}(z)$ arasındadır. Bu durumda, modal katkı veya düzeltme faktörü olarak k_{1i} ve k_{2i} den hangisinin tercih edileceği konusunda bir yaklaşım yapmak ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Birinci mod için bu iki değer birbirine çok yakındır. Bu nedenle birinci mod için işlem yaparken bu ifadelerden herhangi birisini kullanmak mümkündür. Ancak, yüksek modlarda, mod şekli fonksiyonunun yapı yüksekliği boyunca en az bir defa işaret

değiştirmesi nedeniyle, (6.23) ve (6.30) da verilen iki sınır modal katkı veya düzeltme faktörü ifadesinin verdiği sonuçlar arasında oldukça büyük farklılıklar çıkmaktadır. k_{1i} oranının içindeki $[\int \mu_i^2(z) V_o^2(z) dz]^{1/2}$ entegralinin değeri, mod şekil fonksiyonunun önce karelerinin alınması nedeniyle, k_{2i} oranının içindeki $\int \mu_i(z) V_o(z) dz$ sonucundan daima daha büyüktür.

[50] No' lu kaynakda, yüksek modlar için hesaplama yapılırken, elde edilen iki sınır değer ortalamasının kullanılması tavsiye edilmektedir. Yüksek modların, yapının deplasmanları üzerine etkisinin ihmal edilebilecek kadar az olduğu yapılan çalışmalarla gösterilmektedir [25]. Bunun yanında aynı kaynak, ivmeler üzerindeki etkisinin ise %20'ye varan seviyelerde olabileceğini belirtmektedir. Bu nedenle çalışmanın bundan sonraki bölümünde, ivmeler için geçerli ve yüksek modlarda da doğru sonuç veren bir modal katkı veya faktörü tespit edilmesine çalışılmıştır.

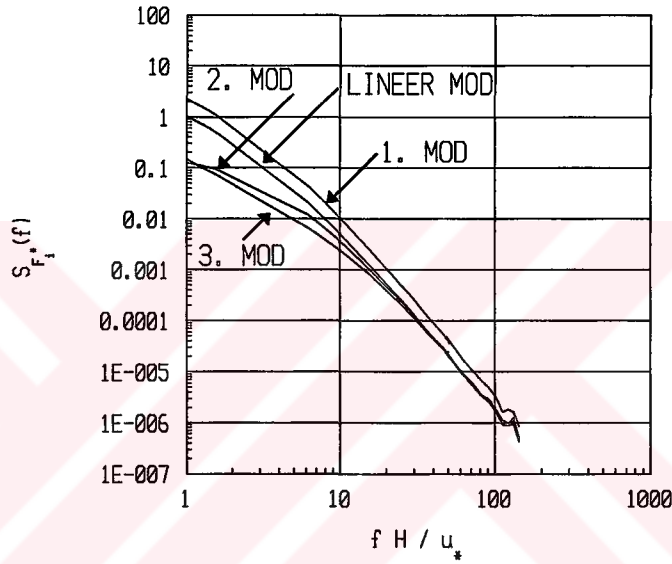
6.2.3. İvmeler İçin, Yüksek Modlarda da Sonuç Veren Bir Katkı Faktörünün Saptanması

$k_i(z)$ modal katkı faktörü ifadelerinin saptanması sırasında karşılaşılan asıl güçlük, (4.22) denklemiyle verilen $S_{Fi}^*(f)$ yüke ait spektral yoğunluk fonksiyonunun yapısı nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu denklem içinde bulunan, üç katlı integralin nümerik çözümü de çok uzun zaman almaktadır. Bu çalışmada, yükün spektral yoğunluğunun hesaplanması sırasında kullanılan ve Simiu ve Lozier [25] tarafından üretilen bilgisayar programında, bu integrallerin hesap süresini bir miktar kısaltabilmek amacıyla, ratgele sayı üretimine dayanan bir metod olan Monte Karlo metodu kullanılmıştır.

Bu programda kullanılan ve 4. bölümde açıklanan yöntemde, $S_{Fi}^*(f)$ fonksiyonu, $H_i(f)$ transfer fonksiyonu ile çarpılıp, integre edilmekte ve daha sonra (4.37), (4.39), (4.42), (4.44) denklemleri yardımıyla, deplasman ve ivme için RMS ve pik faktör değerlerine geçilmektedir. Bu dört katlı integrasyonun doğru sonuç verebilmesi için $S_{Fi}^*(f)$ değerlerinin yeteri kadar sıklıkta değişik frekanslar için hesaplanması gerekir.

Frekans parametresi, (4.22) ile verilen $S_{Fi}^*(f)$ yük spektral yoğunluk fonksiyonu ifadesi içinde bir integral değişkeni değildir. Ancak, koherans fonksiyonunun eksponansiyel yapıdaki ifadesi içinde yer aldığından, bu parametreyi

integrallerin dışına çıkartmak mümkün olamamaktadır. Frekansın, eksponansiyel bir fonksiyon içinde bulunması, mod şekli fonksiyonunun sonucu, değişik frekanslar için farklı şekilde etkilemesine yol açmaktadır. Şekil 6-2 de, frekansa bağlı olarak, değişik mod şekli fonksiyonları için $S_{F_i}^*(f)$ ifadesinin sonuçları eğriler halinde verilmiştir. Buradan, lineer mod ile birinci mod eğrileri arasında bir orantı olduğu, ikinci ve üçüncü mod ile lineer mod arasında böyle bir orantılık oluşmadığı görülmektedir. Lineer mod ile birinci mod arasındaki benzerlik nedeniyle, bunlara ait fonksiyonlar, denklemin karakterini, değişik frekanslar için aynı şekilde etkilemekte, bu da eğrinin orantılı şekilde kaymasına neden olmaktadır.



Şekil 6-2. $S_{F_i}^*$ integralinin, yapının ilk üç modu için değişik doğal frekans değerlerindeki sonuçları.

Bir önceki bölümde yapılan, rüzgar hızının türbülansına ait spektral yoğunluk fonksiyonunun yükseklikle değişmediği kabulü, modal katkı faktörünün oran formunda olması yüzünden önemli bir fark doğurmamaktadır. Aslında bu önemli bir ihmal değildir. Çünkü, (1.9) denklemiyle verilen ve Davenport tarafından önerilmiş olan yükseklikten bağımsız bir rüzgar hızı spektral yoğunluk fonksiyonu ifadesi de mevcuttur.

Referans sistemin, rüzgar yüklerine karşı cevabının hesaplanması sırasında koherins fonksiyonu olarak Vickery tarafından verilen (1.14) ifadesi kullanılmıştır. Burada ise, daha basit bir yapıda olması nedeniyle (1.13) denklemiyle verilen koherins fonksiyonu ifadesi kullanılacaktır. Ayrıca bu ifadenin değerinin, yapının

rüzgar etkisindeki yüzeyinin eni doğrultusunda değişimi ihmal edilecektir. Bu hal için, (6.13) denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$\text{Coh}(z_1, z_2, f) = e^{-\varphi |z_1 - z_2|} \dots \dots \dots (6.35)$$

Burada C_z katsayısı, frekans ve rüzgar hızı, boyutsuz φ parametresinin ifadesi içinde toplanmıştır.

$$\varphi = \frac{f C_z}{V_o(10)} \dots \dots \dots (6.36)$$

C_z katsayısı [10] de veriliği gibi $C_z=6$ olarak alınacaktır. Böylece (4.22) denklemiyle verilmiş olan ifade, i . mod için şu şekilde tekrar yazılabilir.

$$S_{Fi}^*(f) = (C_D \rho B)^2 S_w(f) \int_0^H \int_0^H \mu_i(z_1) \mu_i(z_2) V_o(z_1) V_o(z_2) \text{Coh}(z_1, z_2, f) dz_1 dz_2 \dots (6.37)$$

Bu ifadede rüzgar hızına ait spektral yoğunluk fonksiyonunu izleyen iki katlı integral aerodinamik transfer fonksiyonu olarak isimlendirilir.

$$S_{Fi}^*(f) = (C_D \rho B)^2 S_w(f) Q_i(f) \dots \dots \dots (6.38)$$

(6.17) denklemi (6.19) içinde yerine konursa, aerodinamik transfer fonksiyonu şu şekilde yazılabilir.

$$Q_i(f) = 2 \left[\int_0^H \mu_i(z_1) V_o(z_1) e^{-\varphi z_1} \left(\int_0^{z_1} \mu_i(z_2) V_o(z_2) e^{\varphi z_2} dz_2 \right) dz_1 \right] \\ - \left[\int_0^H \mu_i(z) V_o(z) dz \right]^2 \dots \dots \dots (6.39)$$

Yeni elde edilen, (6.37) ile tanımlanan, dinamik rüzgar kuvvetine ait spektral yoğunluk fonksiyonu ifadesinden yararlanarak, gerçek sistemin i . moduna ait deplasman spektral yoğunluk fonksiyonu şu şekilde yazılabilir.

$$S_{yi}(H,f) = \mu_i^2(H)(\rho C_{DB})^2 |H_i(f)|^2 S_{F_i}^*(f) \dots \dots \dots (6.40)$$

Aynı ifade referans sistem için de geçerlidir.

$$S_{yr}(H,f) = \mu_r^2(H)(\rho C_{DB})^2 |H_r(f)|^2 S_{F_r}^*(f) \dots \dots \dots (6.41)$$

Yapının tepesinde oluşan deplasmanın RMS' lerinin oranını,

$$k_{y\sigma_i} = \frac{\mu_i(H)}{\mu_r(H)} \frac{M_r^*}{M_i^*} \left[\frac{\int_0^\infty |H_i(f)|^2 S_{F_i}^*(f) df}{\int_0^\infty |H_r(f)|^2 S_{F_r}^*(f) df} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (6.42)$$

şeklinde yazılabilir. Bölüm 4.5' de verilen yaklaşımla (6.42) ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$k_{y\sigma_i} = \frac{\mu_i(H)}{\mu_r(H)} \frac{M_r^*}{M_i^*} \left[\frac{\int_0^\infty S_{F_i}^*(f) df + \frac{\pi f_i}{4\xi_i} S_{F_i}^*(f_i)}{\int_0^\infty S_{F_r}^*(f) df + \frac{\pi f_r}{4\xi_r} S_{F_r}^*(f_r)} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (6.43)$$

Aynı şekilde referans sistem ile gerçek yapının tepesinde oluşan ivmelerin RMS' lerinin oranı için de benzer ifade yazılabilir.

$$k_{a\sigma_i} = \frac{\mu_i(H)}{\mu_r(H)} \frac{M_r^*}{M_i^*} \left[\frac{\int_0^\infty f^4 |H_i(f)|^2 S_{F_i}^*(f) df}{\int_0^\infty f^4 |H_r(f)|^2 S_{F_r}^*(f) df} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (6.44)$$

(6.43) ifadesi incelenirse, (6.42) ifadesi üzerinde yapılan basitleştirmelerin $\int_0^\infty S_{F_i}^*(f) df$ integralini yok etmeye yetmediği görülebilir. Bu integralin nümerik olarak hesaplanabilmesi ise, içindeki $S_{F_i}^*(f)$ fonksiyonunun en basit ifadesinin bile, (6.37)' den görülebileceği gibi iki katlı integral formunda olması ve ayrıca integral sınırlarının sıfır ile sonsuz arasında olması nedenleriyle oldukça zahmetlidir. Bu durum, (6.43) ifadesinin pratikte kullanılabilirliğini olanaksız kılmaktadır.

Halbuki, ivmeler için yazılan (6.44) ifadesinde yer alan integrallerin içinde f^4 teriminin bulunması nedeniyle, Bölüm 4.5' de (4.55) denklemiyle tanımlanan kısaltmaya ilaveten, (4.57) denklemi ile ifade edilen basitleştirme de bu integralere uygulanabilir. Böylece, (6.44) ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$k_{\sigma i} = \frac{\mu_i(H)}{\mu_r(H)} \frac{M_r^*}{M_i^*} \left[\frac{Q_i(f)}{Q_r(f)} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (6.45)$$

(6.17) ifadesi incelenirse, ivmeler için verilmiş olan modal katkı veya düzeltme faktörlerinin ifadeleri içinde, $k_{\sigma i}$ ' ye çarpan olarak gelen bir terim daha vardır. Bu terim gerçek ve referans sistemlerin tepe noktalarındaki ivmelerin (4.44) te verilen pik faktörlerinin birbirine oranıdır. İvmeler için $k_{\sigma i}$ katsayılarında yapılan basitleştirmenin yanı sıra, bu pik faktör oranlarında da bir basitleştirme yapılabileceği Simiu [25] tarafından gösterilmiştir. Adı geçen referansta bu basitleştirme,

$$v_a(z) \approx f_i \dots \dots \dots (6.46)$$

kabulü ile gerçekleştirilmektedir. Bu durumda, referans sistem ve gerçek sisteme ait ivme pik faktörlerinin arasındaki oranın, iki sistemin de aynı frekansta olmaları durumuna göre hesaplanması nedeniyle, yaklaşık olarak bire eşit alınabileceği sonucu ortaya çıkar. Böylece, (6.45) ifadesi direkt olarak ivmeler için i . moda ait modal katkı veya düzeltme faktörünü verecektir. Bu sayede, (6.39), (6.45) ve (6.46) ifadelerinden yararlanılarak, ivmeler için yüksek modlarda da doğru sonuç veren, modal düzeltme veya katkı faktörlerinin hesaplanması mümkündür.

Bu faktörlerin verilen bir yapı için nasıl hesaplanacağı ve ne derece iyi sonuç verdiği, izleyen bölümlerde yer alan sayısal uygulamalarda gösterilecektir.

BÖLÜM 7

RÜZGAR CEVAP SPEKTRUMU EĞRİLERİ

Yüksek yapıların, rüzgarın esiş yönündeki deplasman ve ivme değerlerinin, önceki bölümlerde açıklanmış olan cevap spektrumu yöntemiyle hesaplanabilmesini sağlayabilmek amacıyla, bu bölümde değişik özellikteki bir grup referans yapıya ait, yanal tepe deplasman ve ivmesi için rüzgar spektrumları hazırlanmış ve takip eden sayfalarda eğriler halinde verilmiştir.

Yüksek yapılar genellikle büyük şehirlerin merkezlerinde yer alırlar. Bu nedenle sözedilen spektrumların hazırlanması sırasında kullanılan referans yapının şehir merkezinde olduğu varsayılmıştır. Yapının bulunduğu yer çevre pürüzlülüğü açısından önemlidir. Çevre pürüzlülüğüne bağlı parametrelerden birisi olan, z_0 pürüzlülük uzunluğu değeri 0.5 alınarak hesap yapılmıştır. Bu değer, Tablo 1-2' den şehir merkezi olarak kabul edilebilecek IV ve V numaralı bölgeler için verilen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır. Çevre pürüzlülüğüne bağlı diğer bir katsayı, z_d sıfır düzlemi deplasmanıdır. Bu değer artışı, yapıya etkiyen rüzgar hızını azaltıcı yönde etkilemektedir. Bu nedenle, gayrimüsaait tarafta kalmak için $z_d = 0$ olarak hesap yapılmıştır.

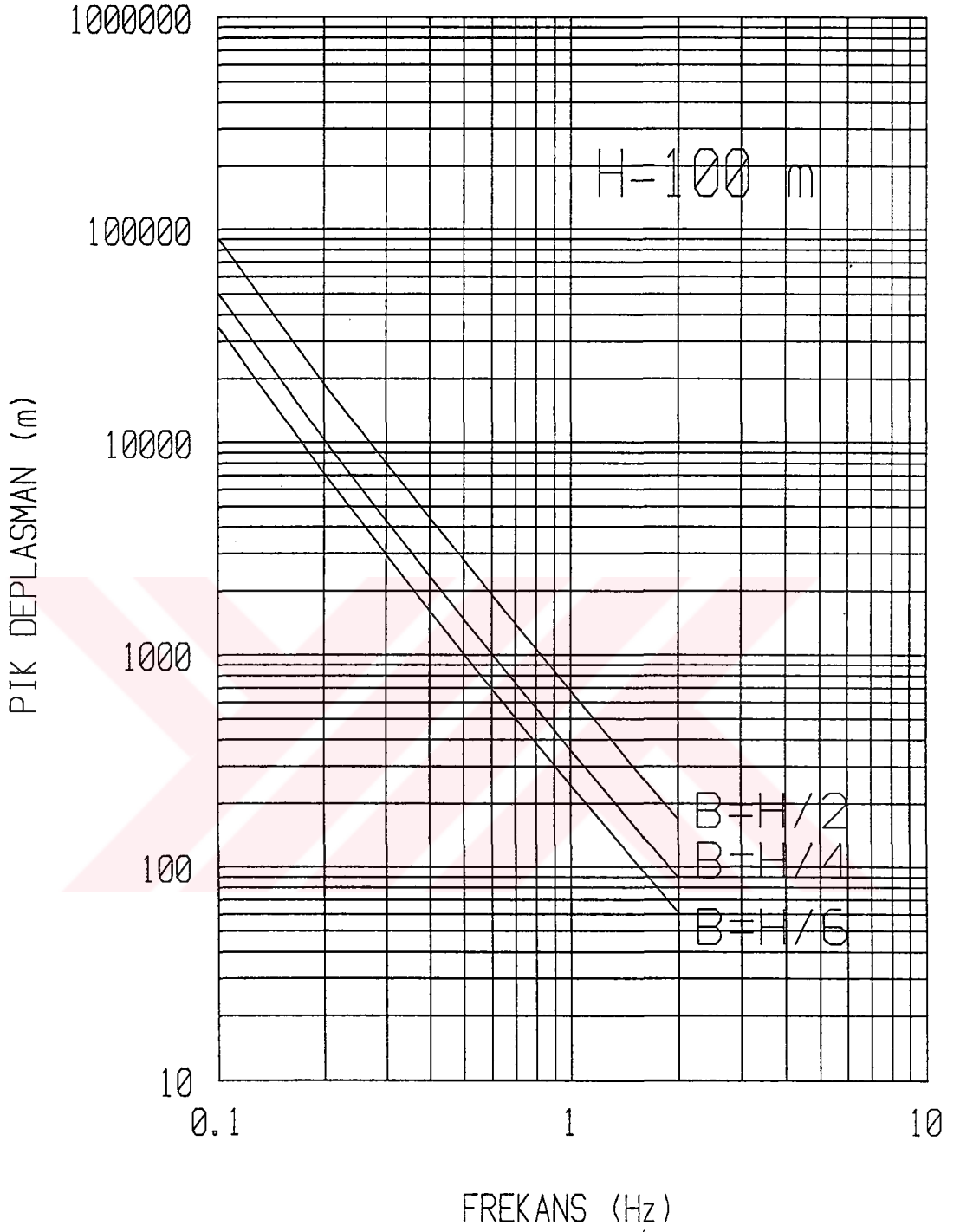
Bölüm 6.1.1' de açıklanan, mod şekli doğrusal ve temel hizasından bir dönel yay ve dinamik söndürücü ile bağlanmış, rijit bir blok şeklindeki referans yapının, üzerine rüzgarın esiş yönünde etkiyen kuvvetler nedeniyle tepesinde oluşacak maksimum yanal deplasman ve ivme değerleri, 4. bölümde açıklanan yonteme göre çözüm yapan bir bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır. Elde edilen deplasman ve ivme sonuçları, yatay eksen değişik yapı frekanslarını gösteren bir ortogonal eksen takımında diyagramlar halinde verilmiştir.

Bu şekilde üç değişik rüzgar hızı, üç yapı yüksekliği, üç yükseklik/genişlik oranı ve iki sönüm oranı için toplam $3 \times 3 \times 3 \times 2 \times 2 = 108$ adet deplasman ve ivme grafiği hazırlanmıştır. Spektrumlarda tercih edilen yapı doğal frekansları 0.1 Hz.' den 2.0 Hz.' e kadar olanlarıdır. Deplasman ve ivme değerleri 0.1 Hz.' lik adımlar için elde edilmiştir.

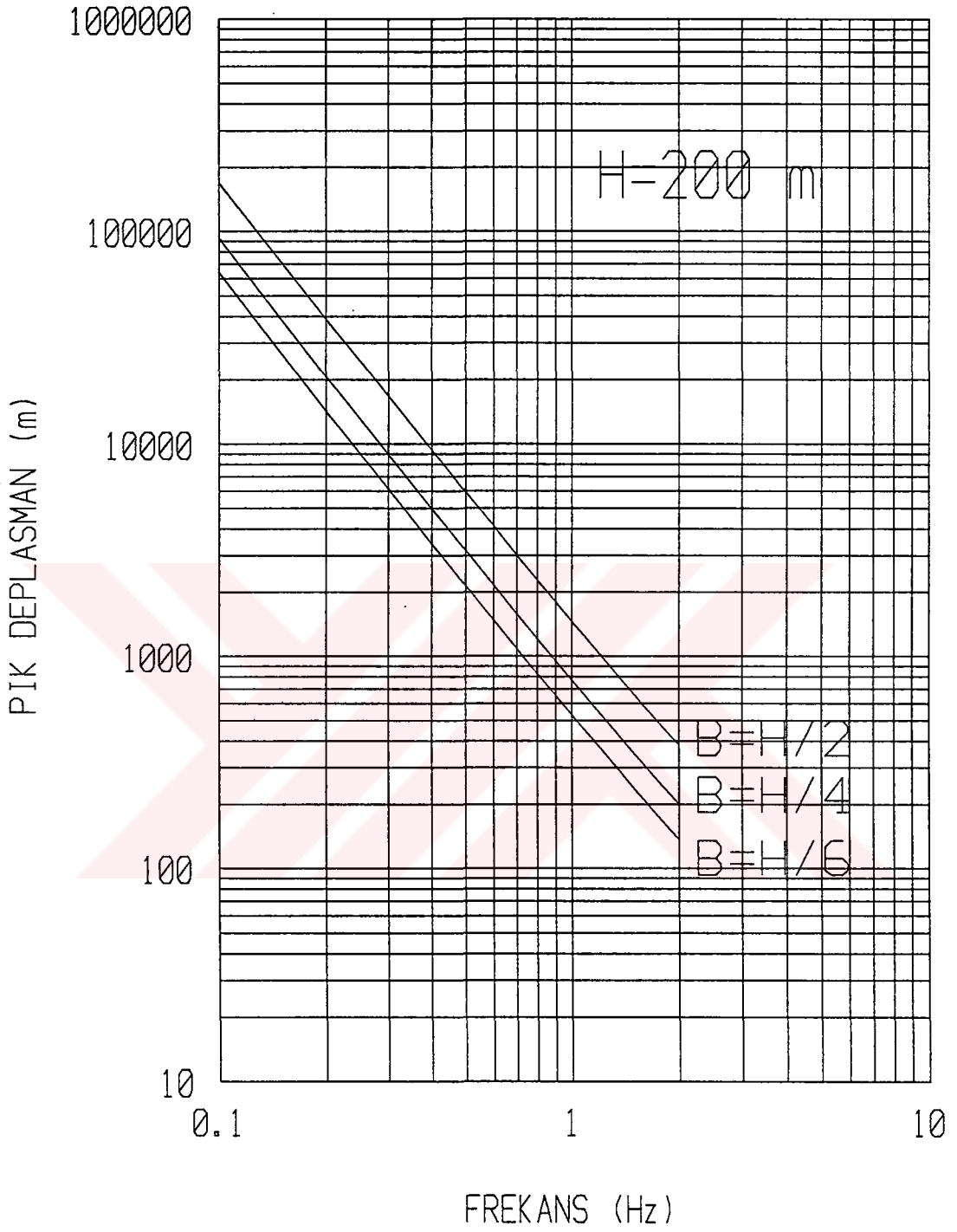
Rüzgar hız profili ve zamana bağlı rüzgar hızının spektral yoğunluk fonksiyonu olarak Simiu tarafından teklif edilen ifadeler kullanılmıştır (1.3)(1.10). Dikkate alınan rüzgar hızları, referans yükseklik olan $z_r = 10m$. de $V_o(10) = 50, 80$ ve 100 km/saat' dir. u_* sürtünme hizi değeri, her rüzgar hızı değeri için (1.5) denkleminde hesaplanacaktır. Basınç katsayısı C_D , 1.3 olarak kullanılmıştır. Bu değer, yapının rüzgarın esiş yönündeki basınç katsayısı 0.8 ve diğer taraftaki emme katsayısı 0.5' in toplamıdır. (1.14) denkleminde verilmiş olan koherans fonksiyonunun katsayıları $C_z = 16$ ve $C_x = 10$ olarak seçilmiş ve havanın yoğunluğu $\rho = 1.25$ kg/m³ olarak alınmıştır.

Yapısal parametrelerden, yapı yükseklikleri $H = 100, 200, 300$ m., yükseklik/genişlik oranları $H/B = 2, 4, 6$ olarak kullanılmıştır. Hesaplarda tercih edilen sönüm oranları ise 0.02 ve 0.05 değerleridir. Yapının, yüksekliğince üniform birim kütle dağılımına sahip olduğu kabul edilmiştir. Sadece rüzgarın esiş yönündeki etkiler ve sonuçları dikkate alınmıştır.

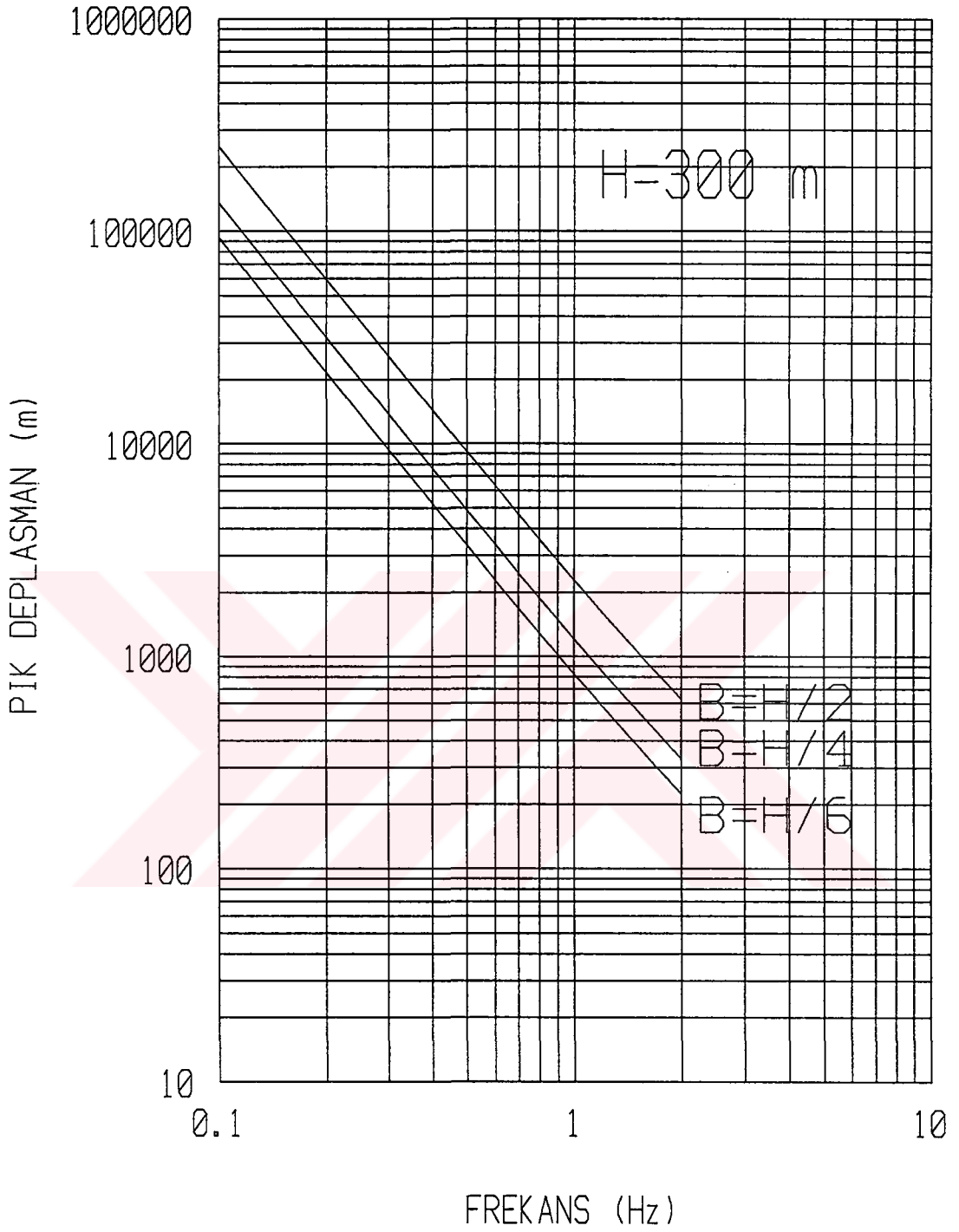
Rüzgara ve yapıya ait yukarıda sözedilen parametrelerin her kombinezonu için yapının tepesindeki pik dinamik deplasman ve ivme değerleri, yapı doğal frekansının 0.1 Hz.' den 2.0 Hz.' e kadar 0.1 Hz.' lik artımları için hesaplanmış ve yatay eksen frekans, düşey eksen ise pik deplasman veya ivme değerlerini göstermek üzere, diyagramlar halinde gösterilmiştir. 7-1' den 7-3' e kadarki şekiller sönüm oranının 0.02 değeri, 7-4' den 7-6' ya kadarki şekiller ise bu oranın 0.05 değeri için deplasman cevabı spektrumlarıdır. 7-7' den 7-12' ye kadar verilmiş olan şekiller ise, benzer şekilde ivmeye ait spektrum eğrileridir. Deprem spektrumlarından da alışılmış olduğu gibi, burada da spektrum eğrilerinin iki eksenini de logaritmik ölçekte çizilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi, deplasman spektrum eğrilerinin doğrusal olmasına rağmen ivme spektrumlarının doğrudan bir miktar farklı olması ilk bakışta dikkat çekici bir sonuçtur.



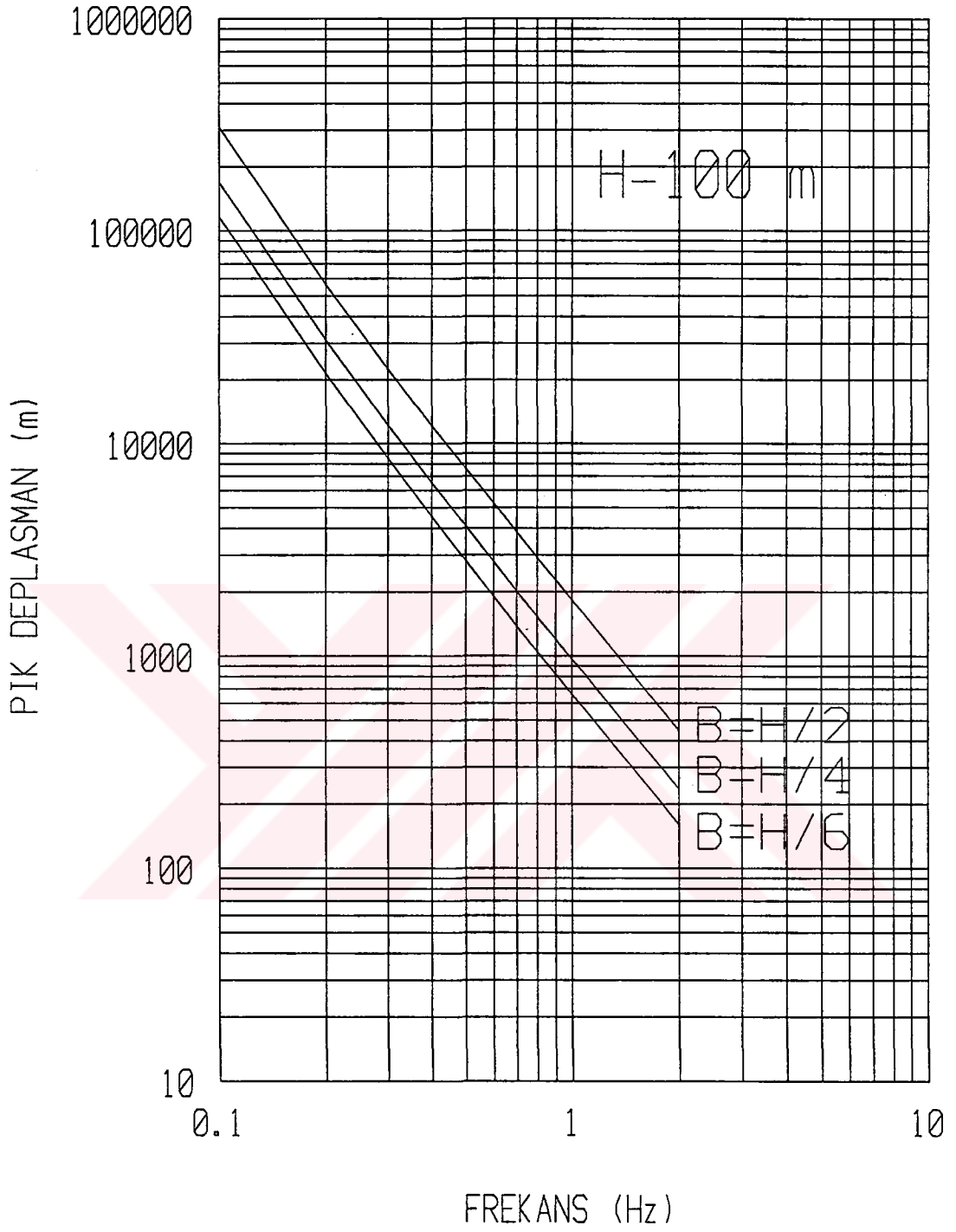
Şekil 7-1. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 50$ km/saat, $H = 100$ m.)



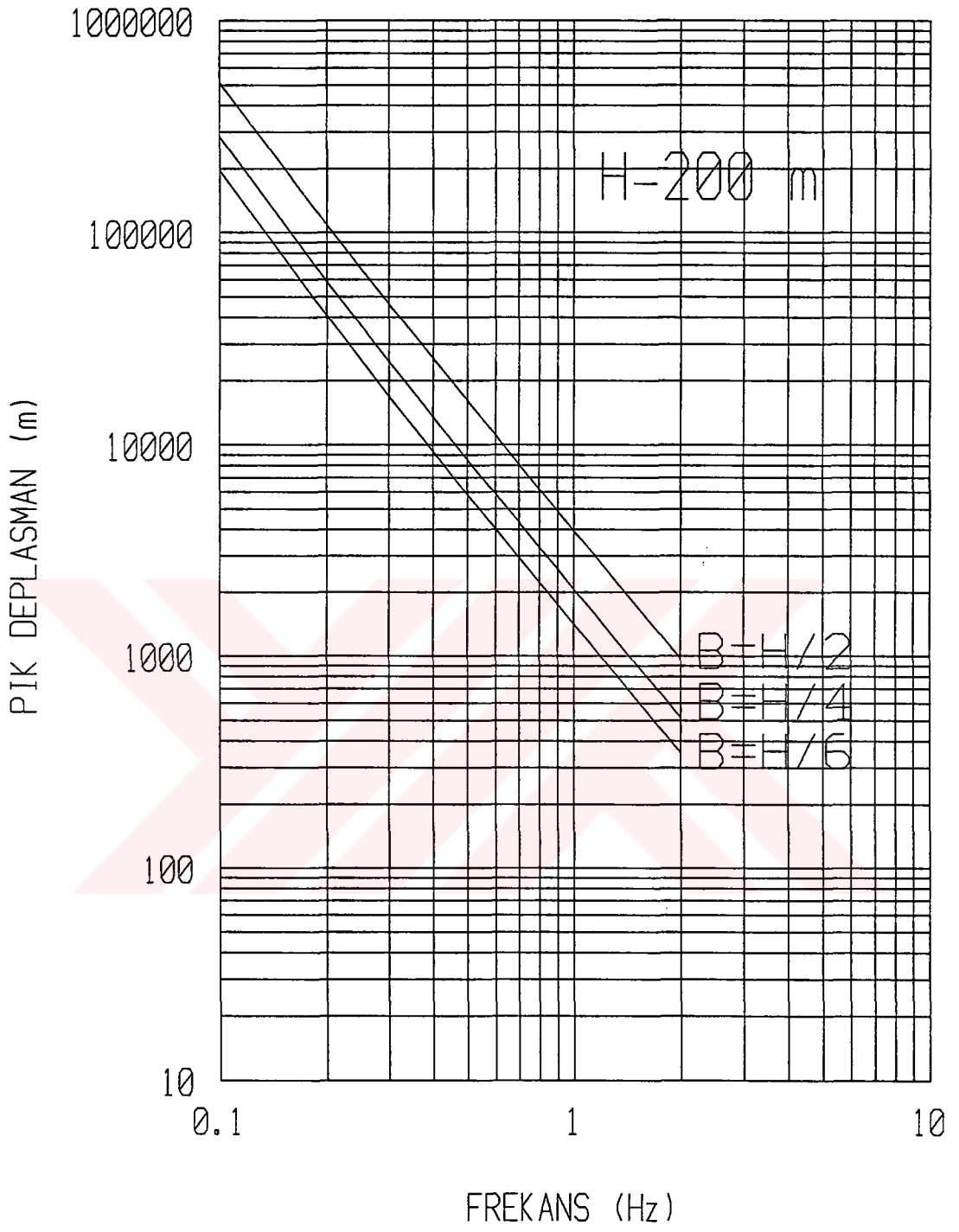
Şekil 7-2. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m}$.)



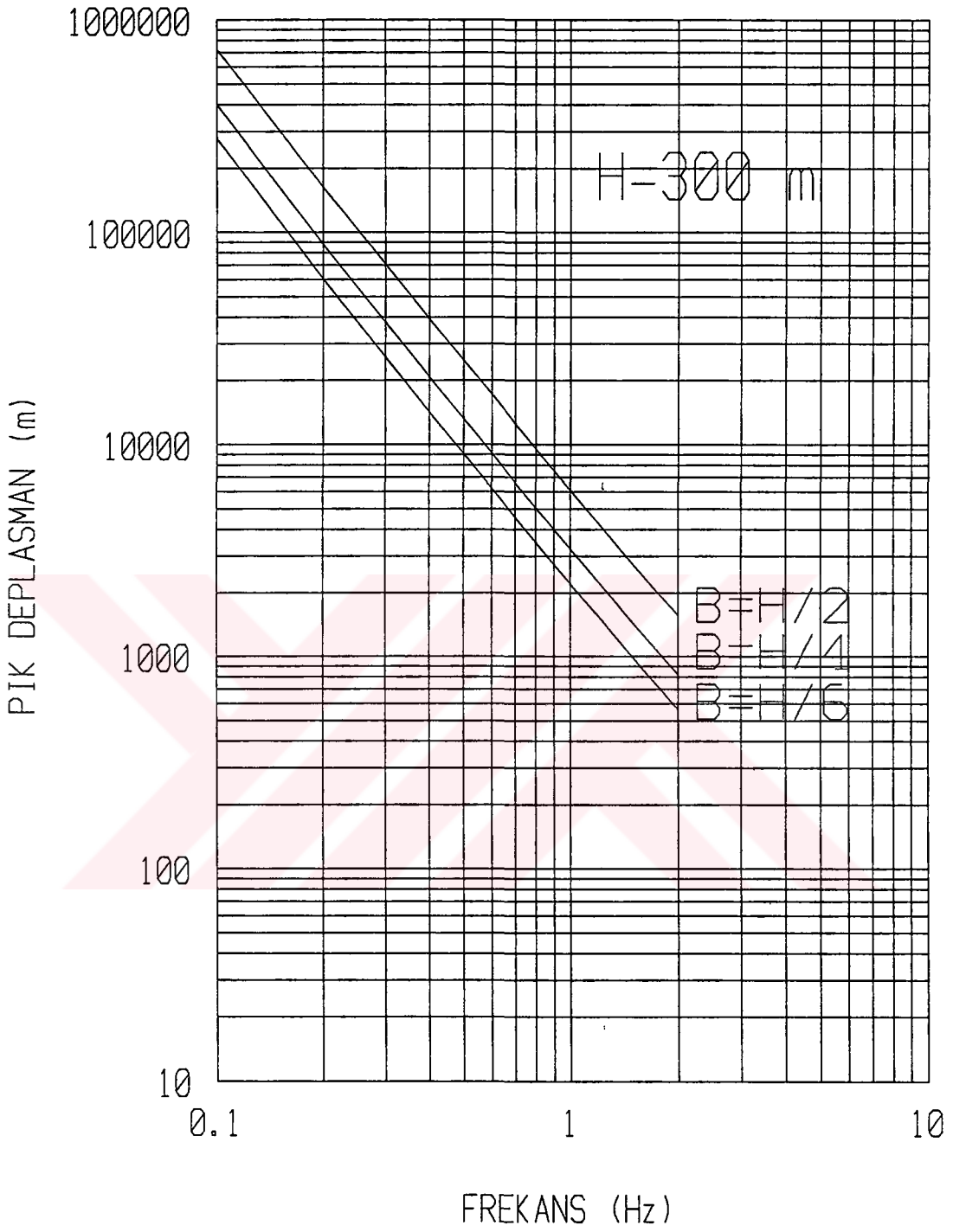
Şekil 7-3. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_{o(10)} = 50 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)



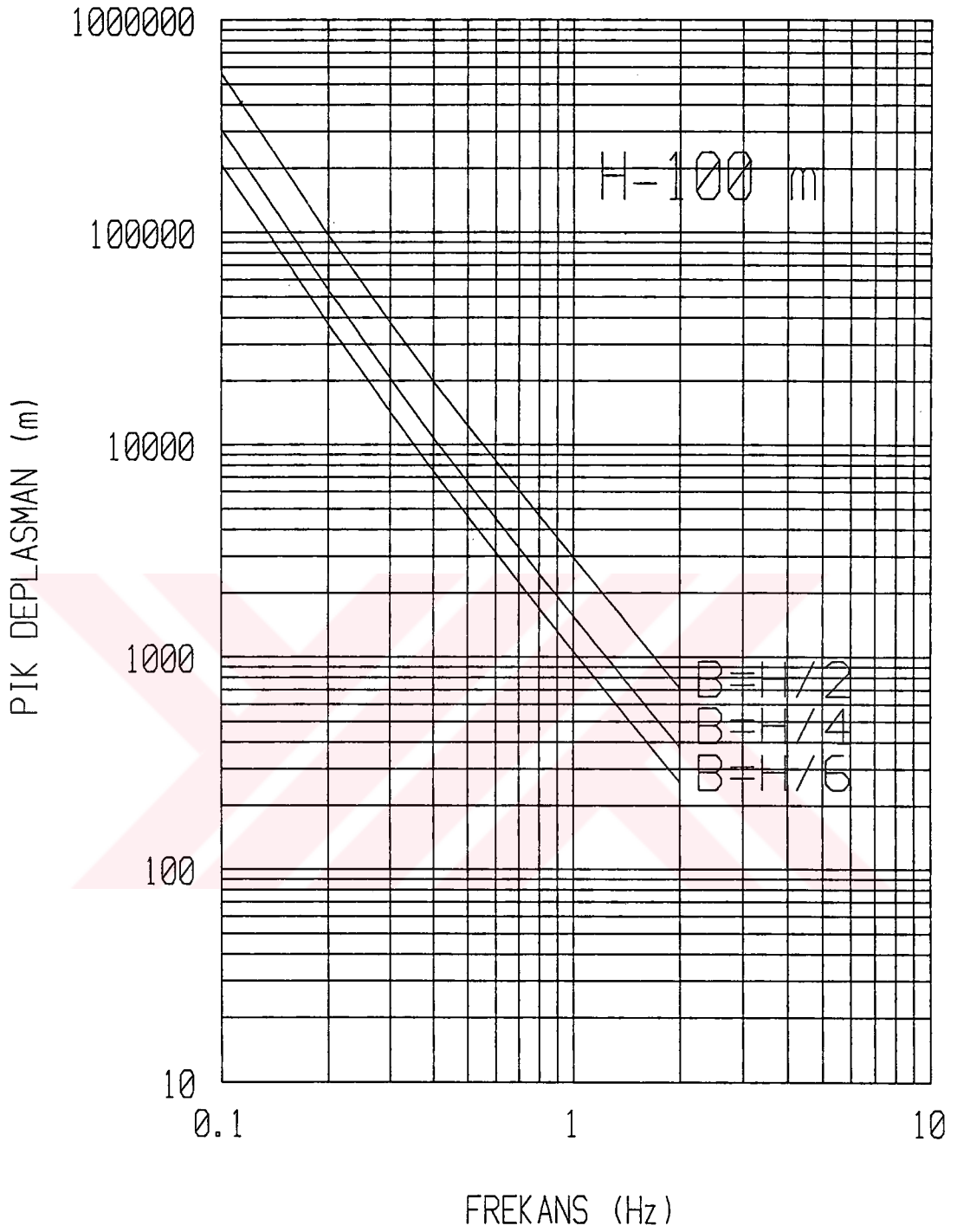
Şekil 7-4. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 ($S_{\text{önüm}} = 0.02$, $V_o(10) = 80$ km/saat, $H = 100$ m.)



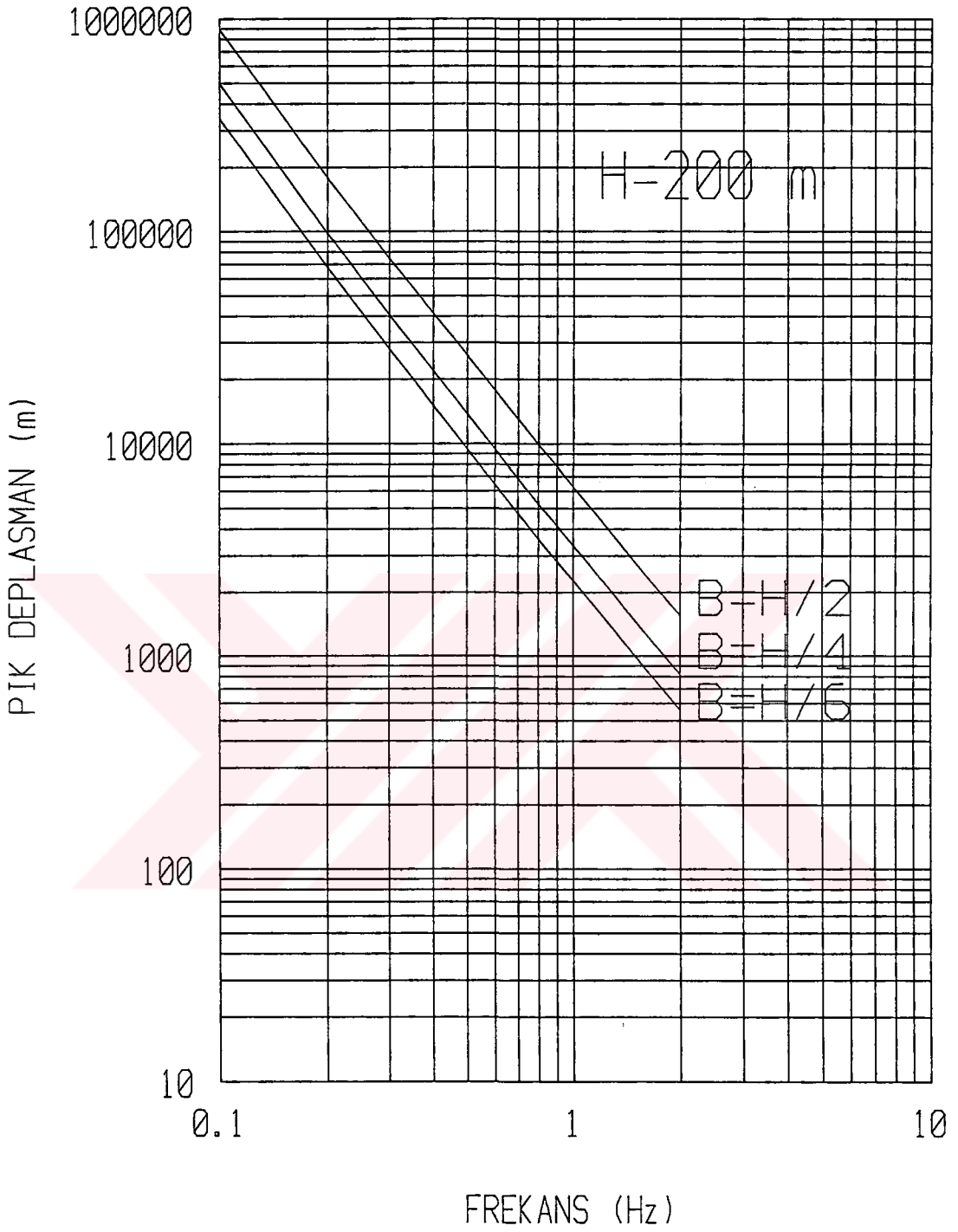
Şekil 7-5. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)



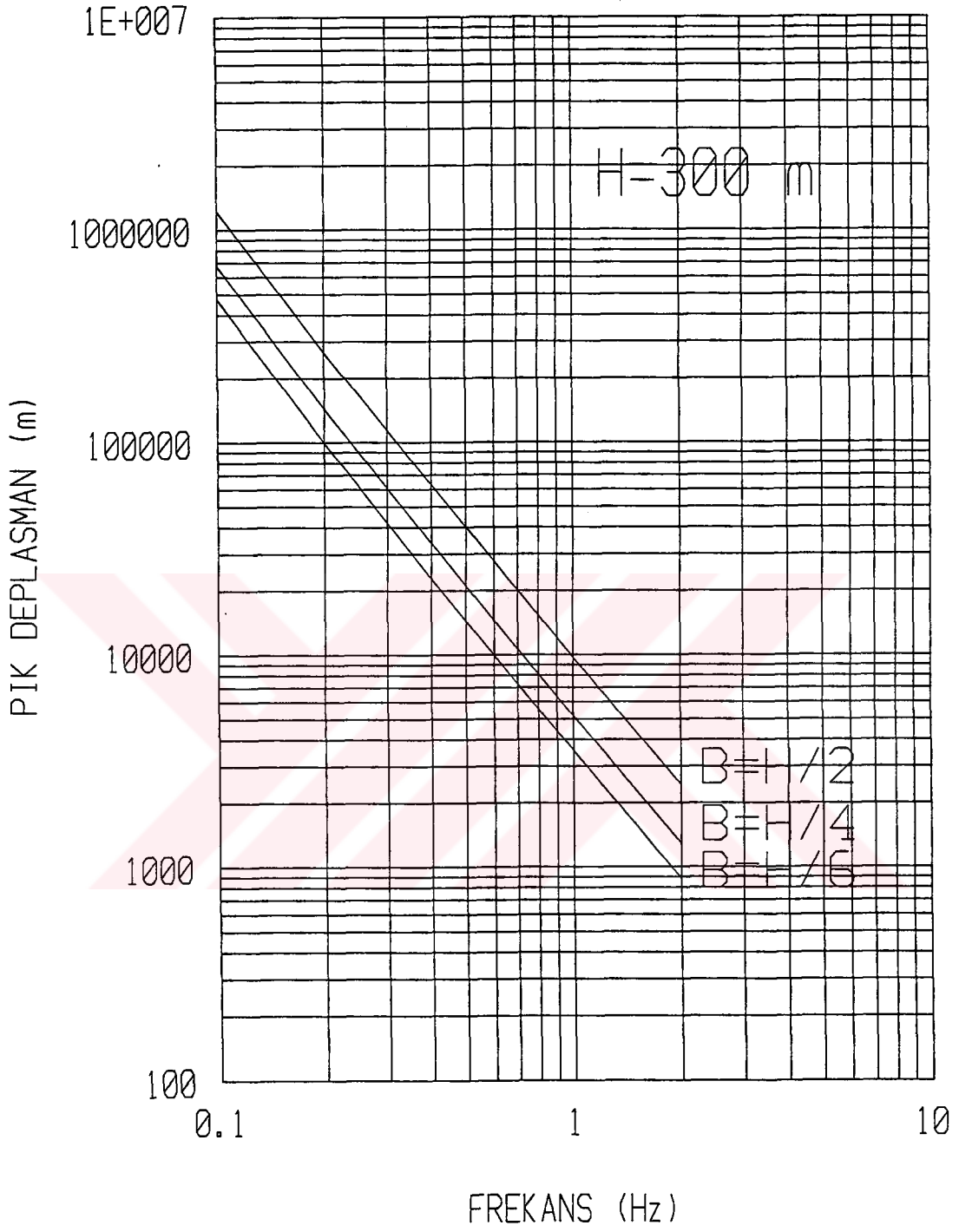
Şekil 7-6. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)



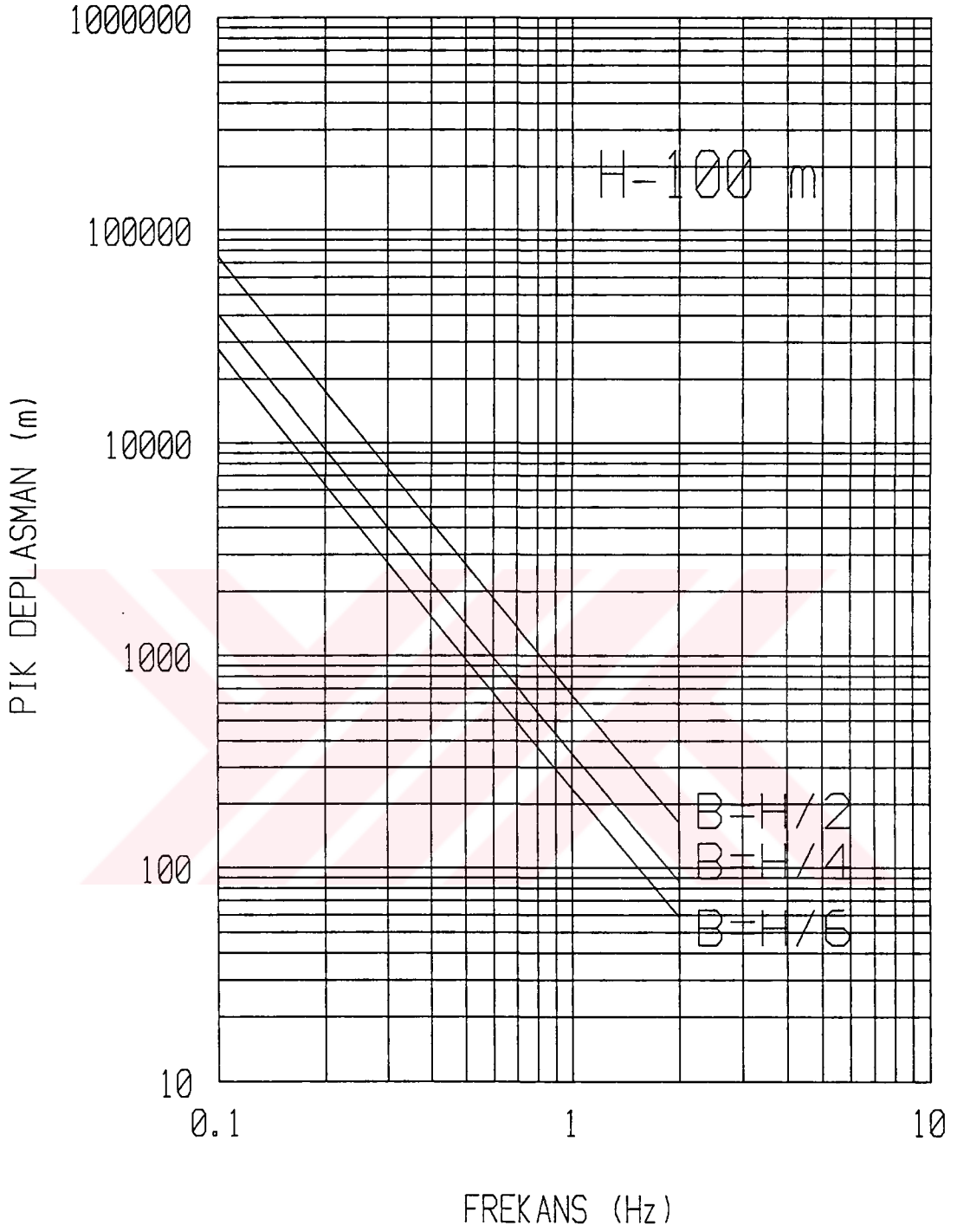
Şekil 7-7. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_{o(10)} = 100 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)



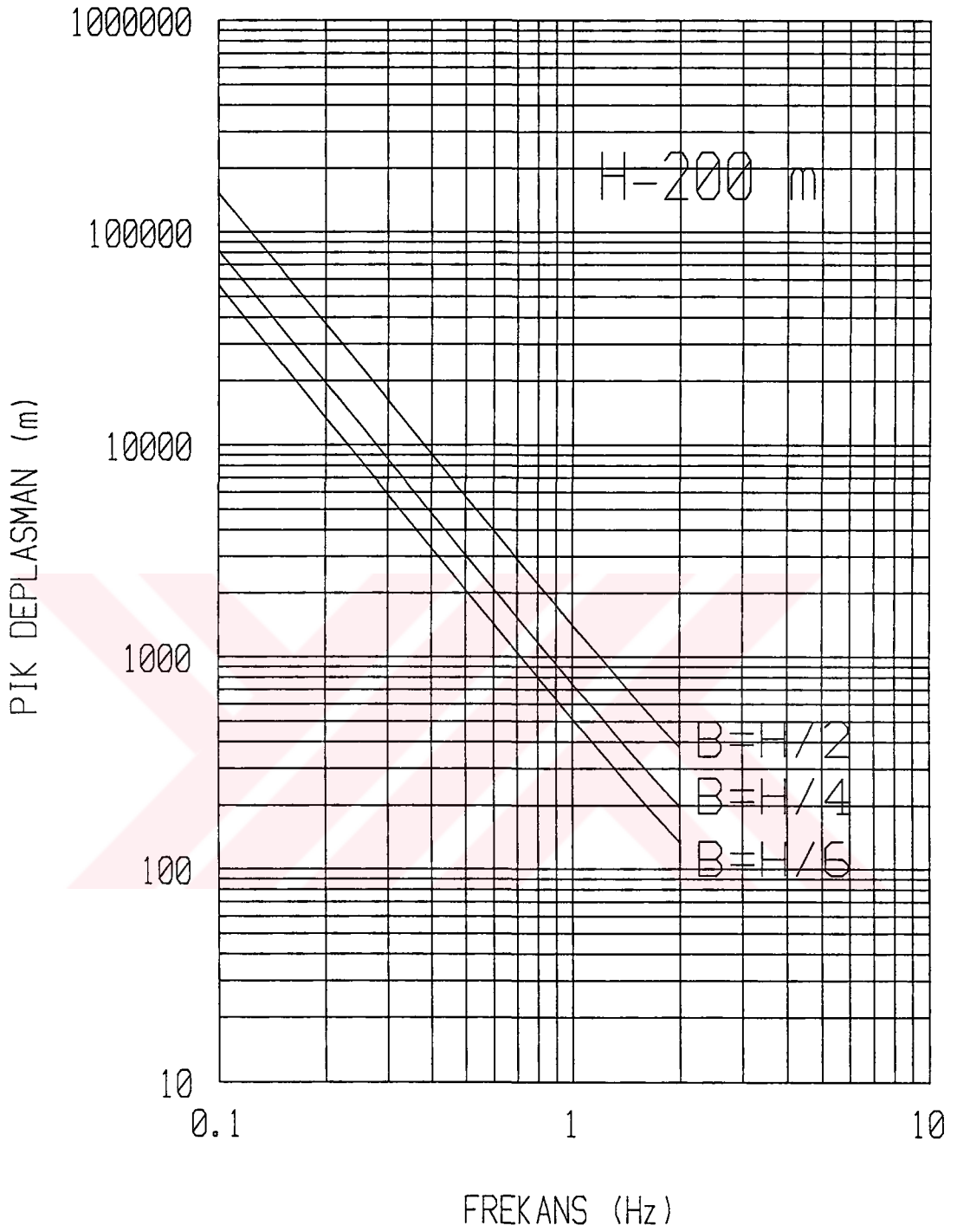
Şekil 7-8. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_{o(10)} = 100 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)



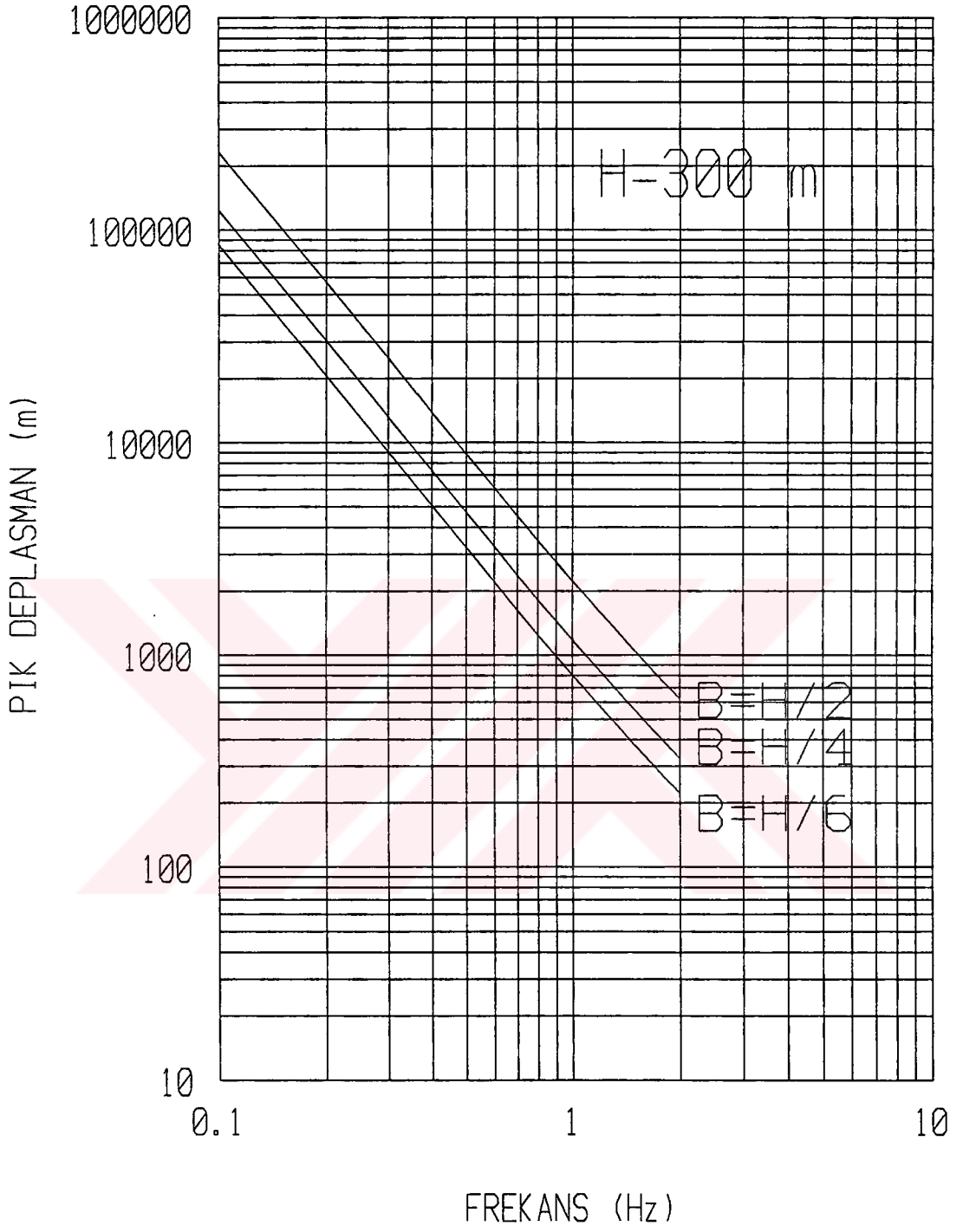
Şekil 7-9. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)



Şekil 7-10. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m}$.)

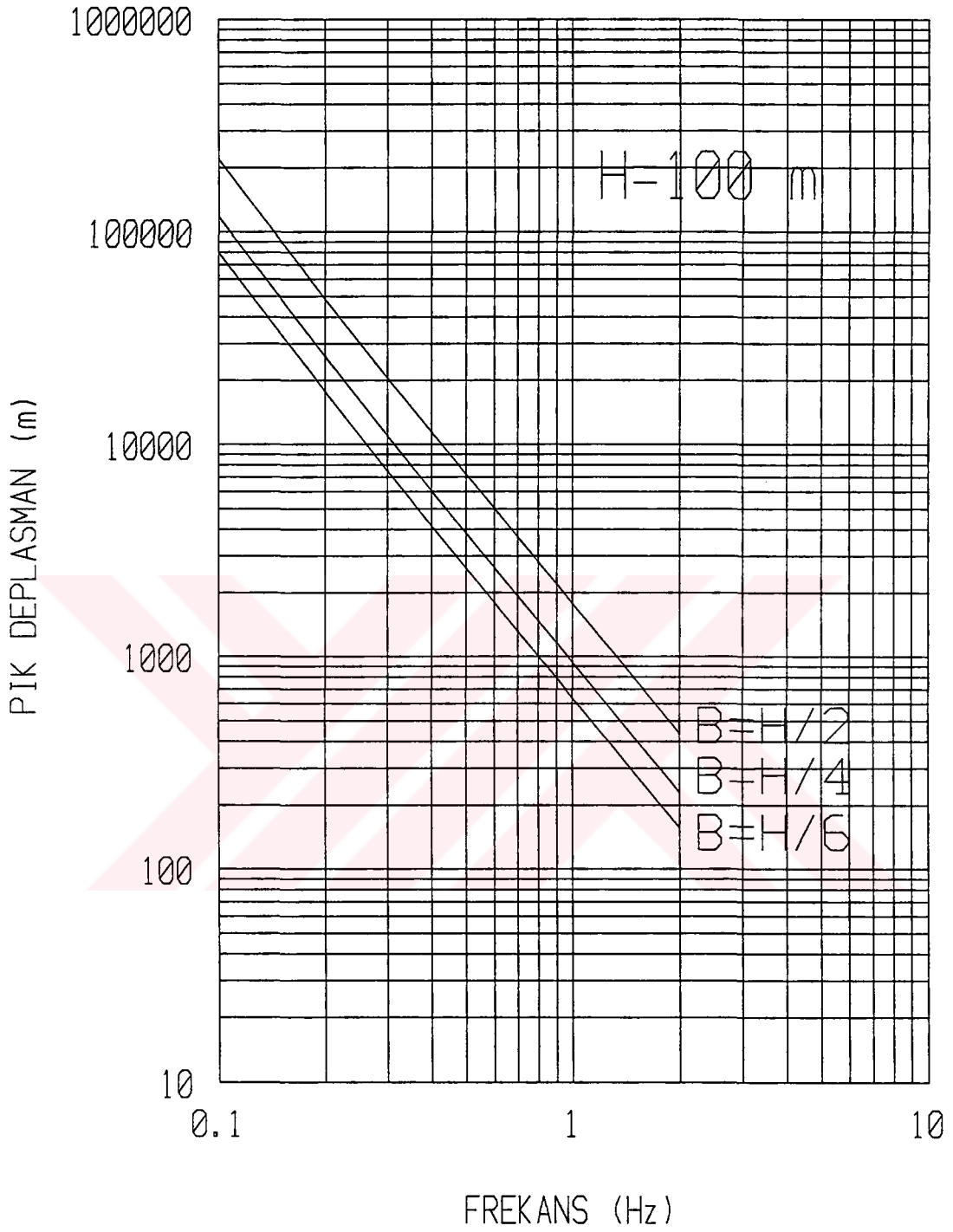


Şekil 7-11. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)



Şekil 7-12. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu

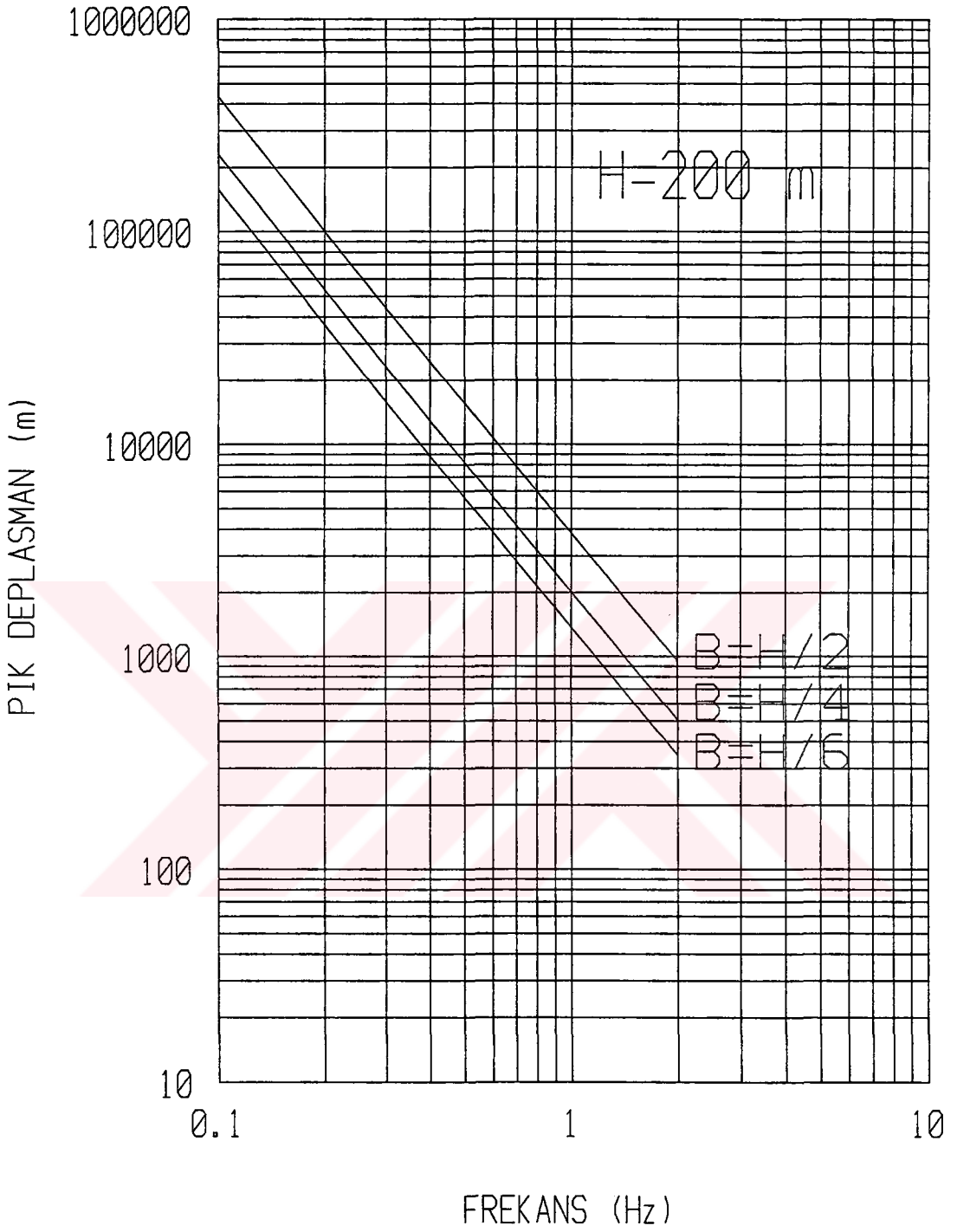
(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)



Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

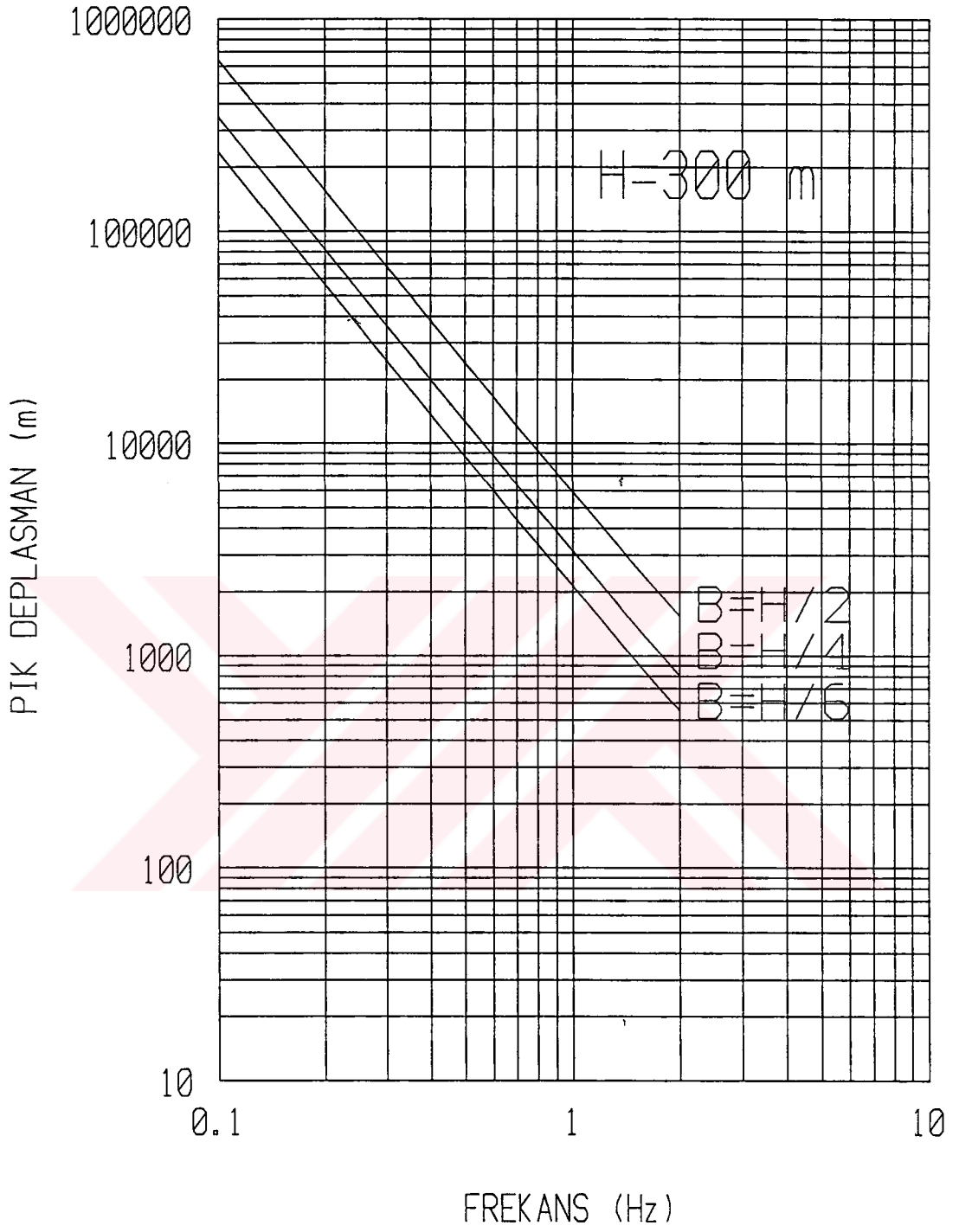
Şekil 7-13. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu

(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)



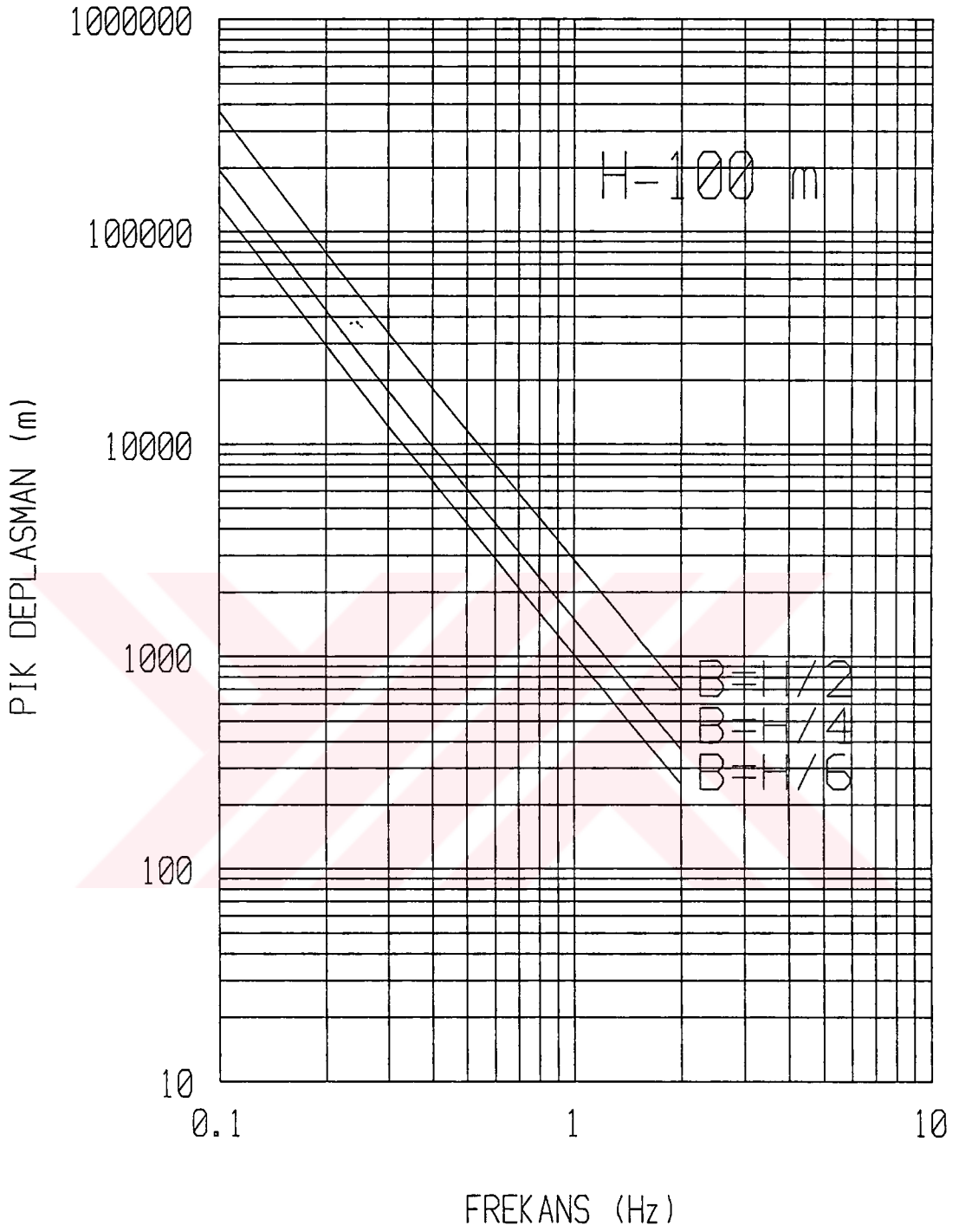
Şekil 7-14. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu

(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m}$.)

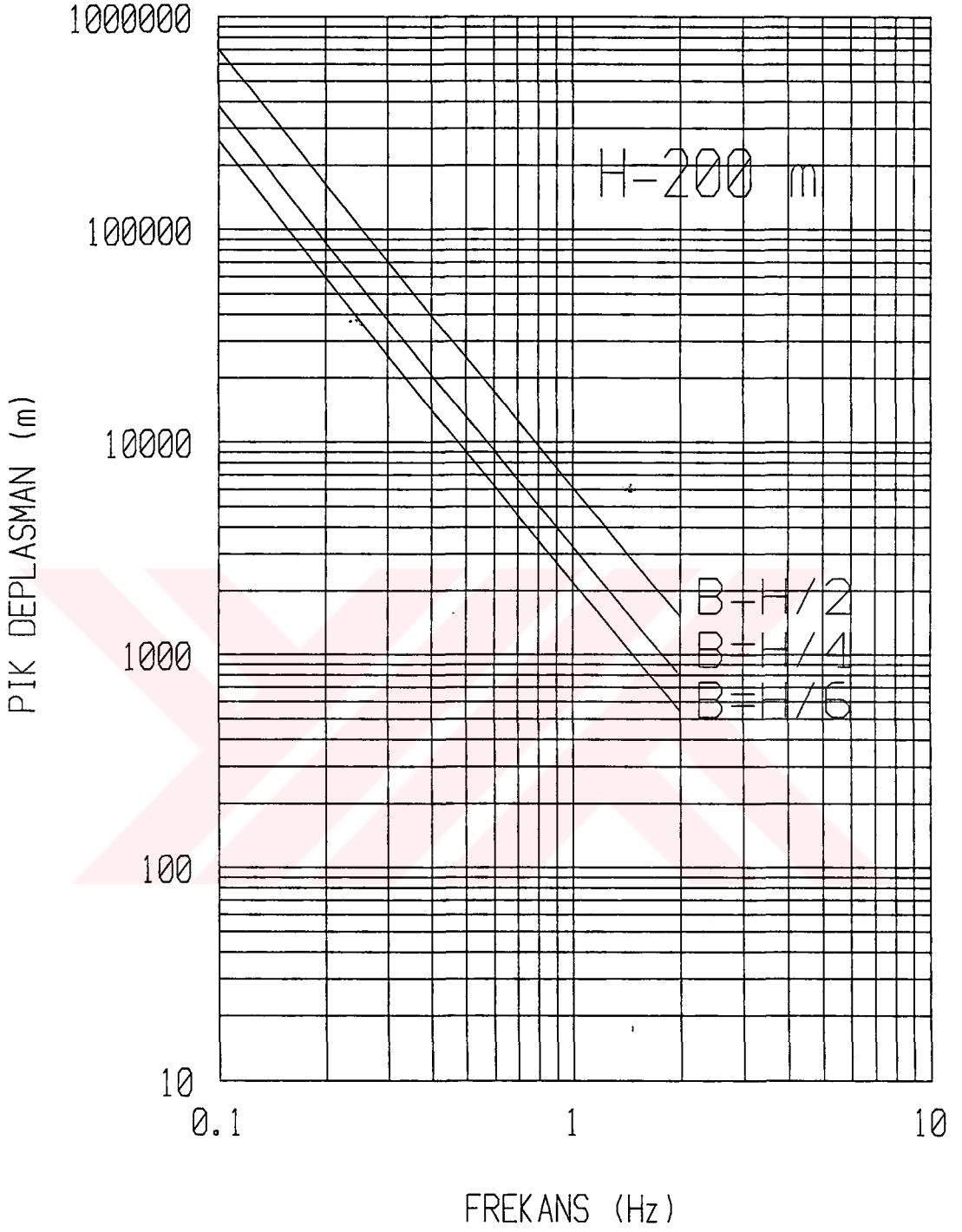


Şekil 7-15. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu

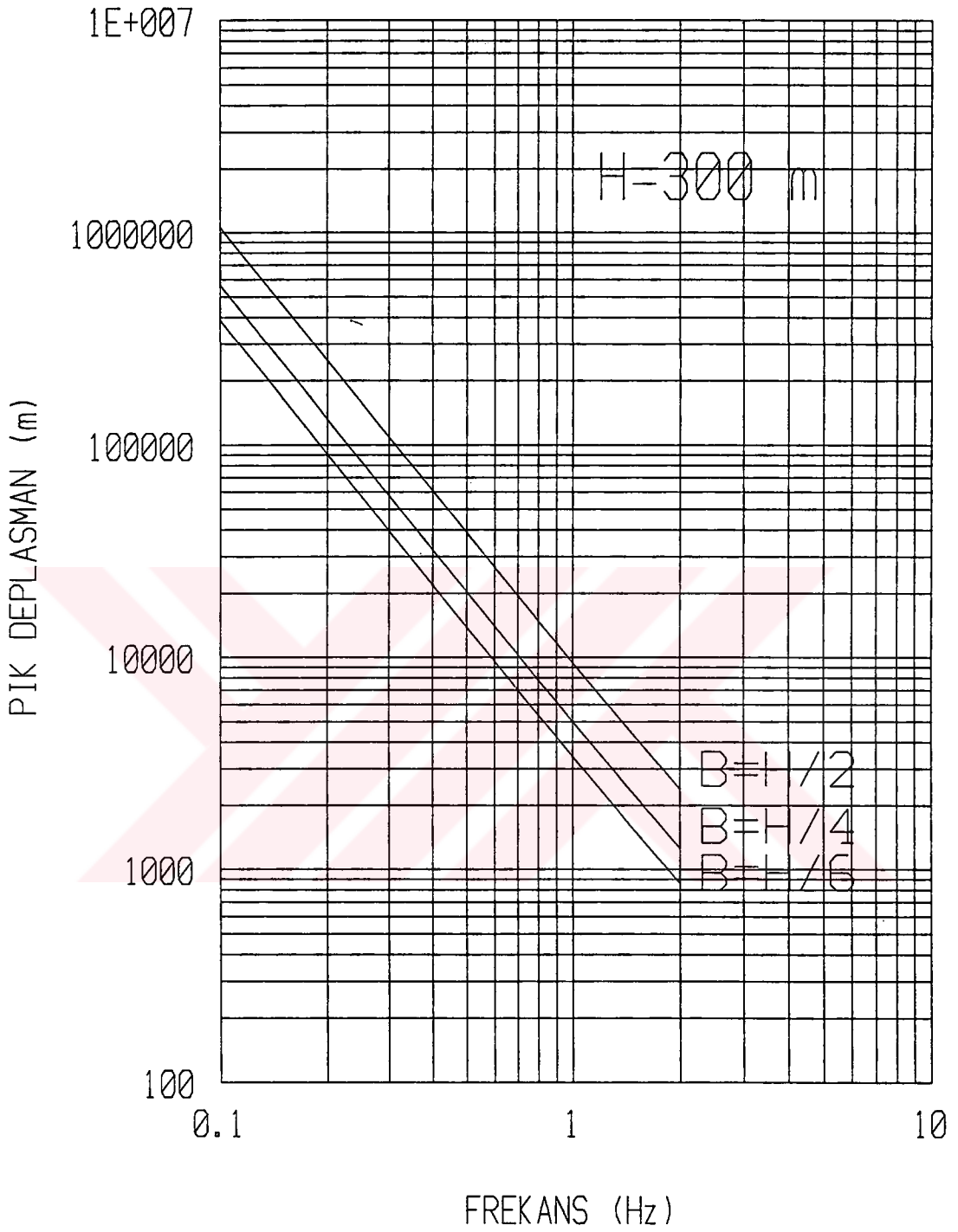
(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 80$ km/saat, $H = 300$ m.)



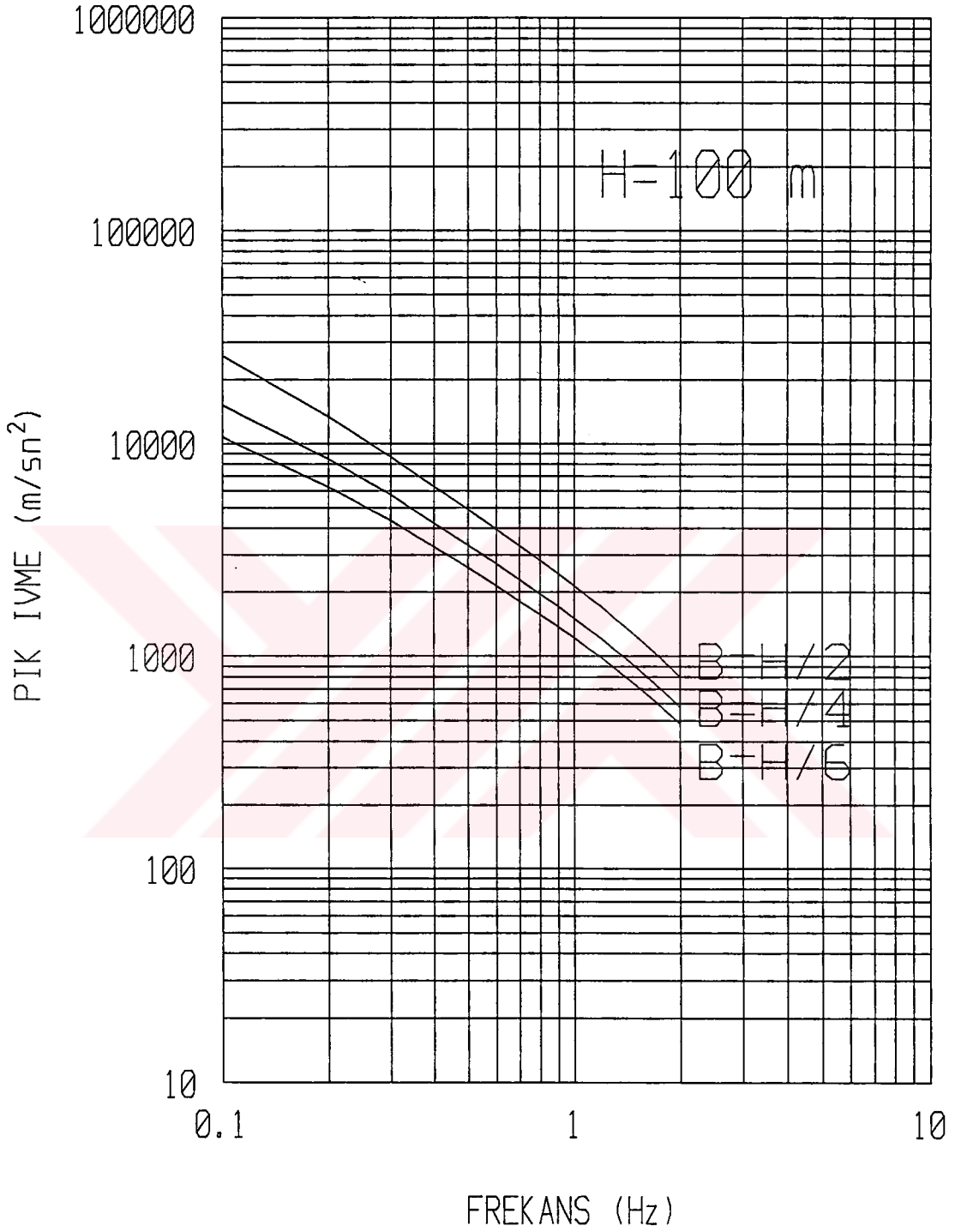
Şekil 7-16. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 100$ km/saat, $H = 100$ m.)



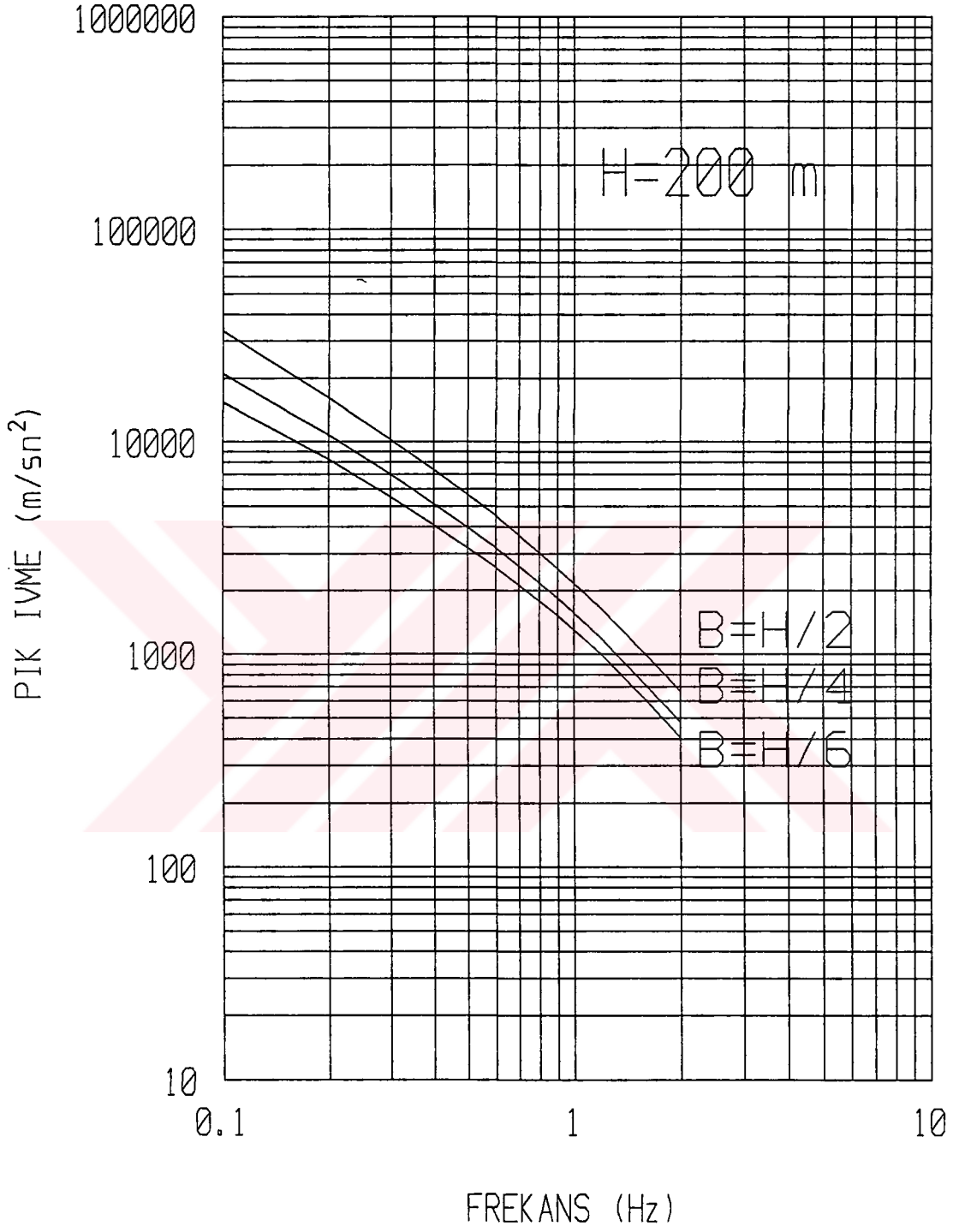
Şekil 7-17. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)



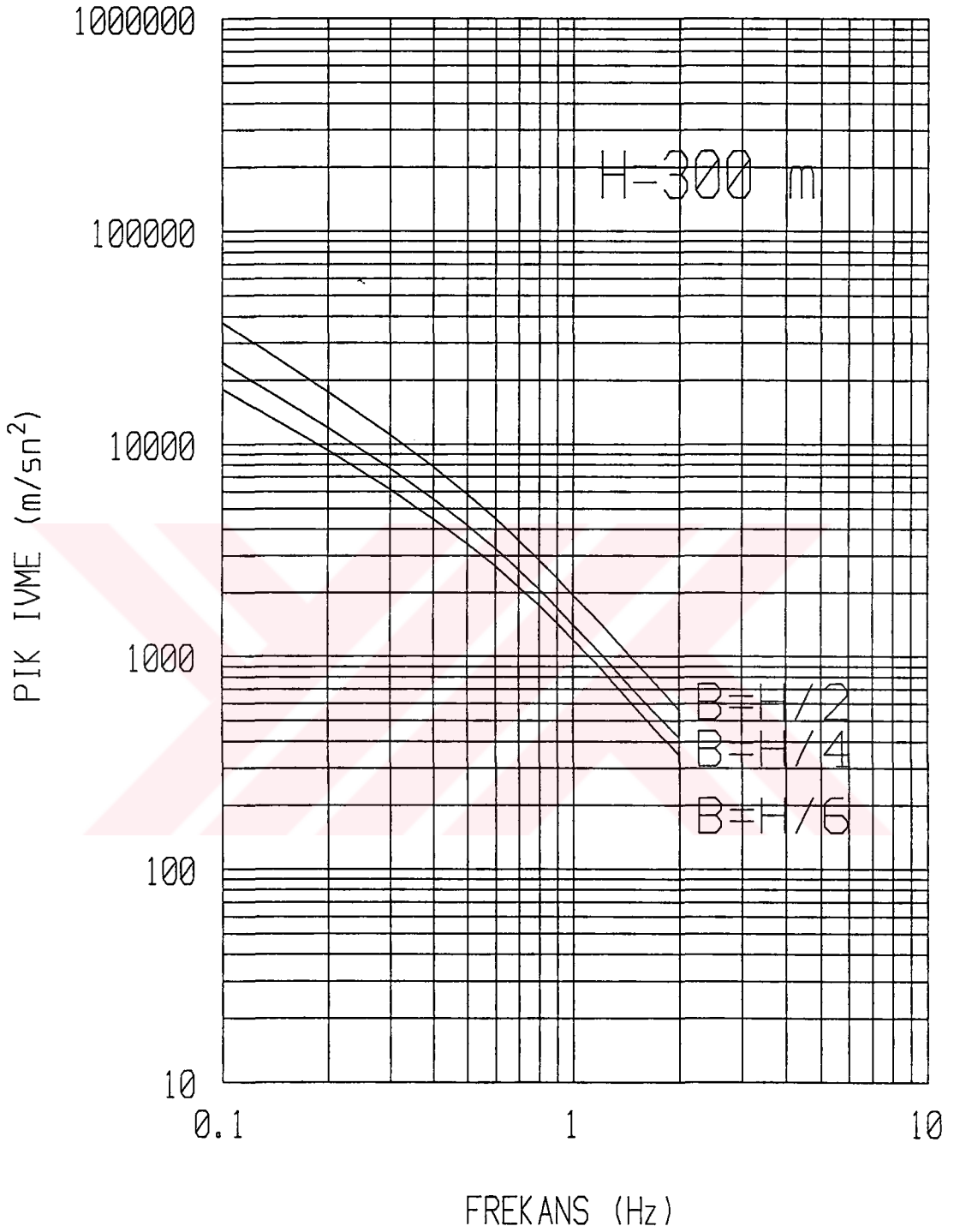
Şekil 7-18. Referans yapı için deplasman cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)



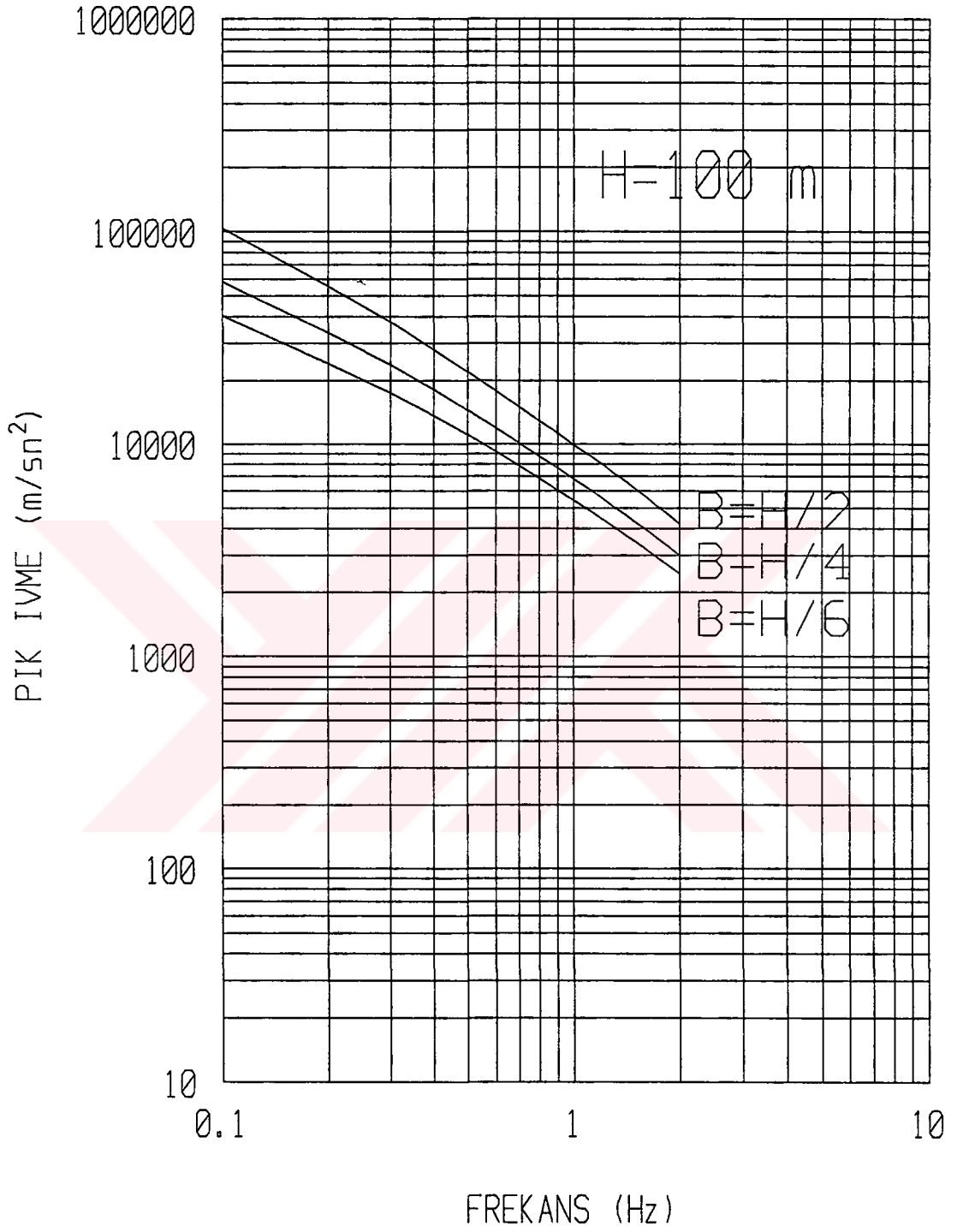
Şekil 7-19. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
(Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m}$.)



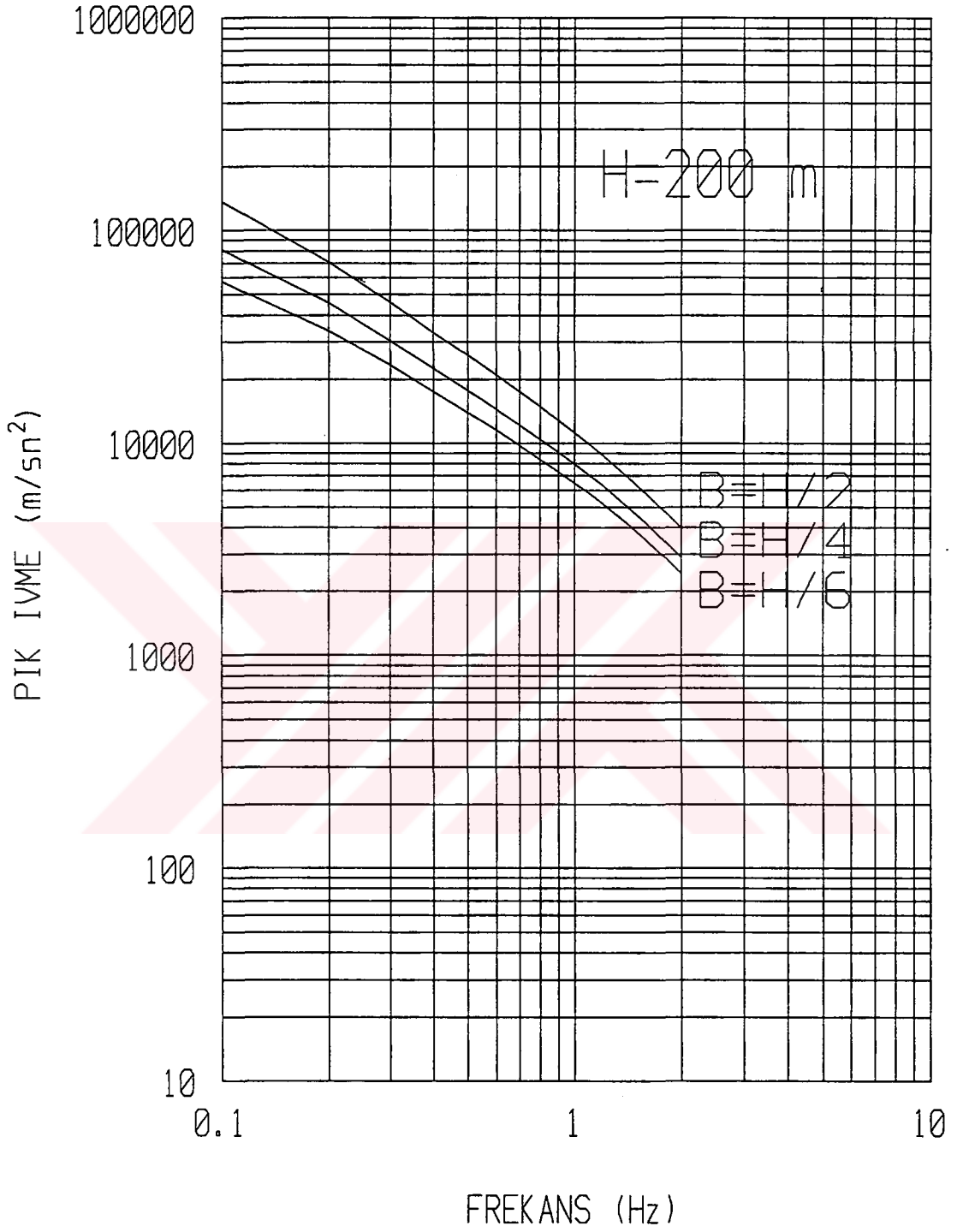
Şekil 7-20. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)



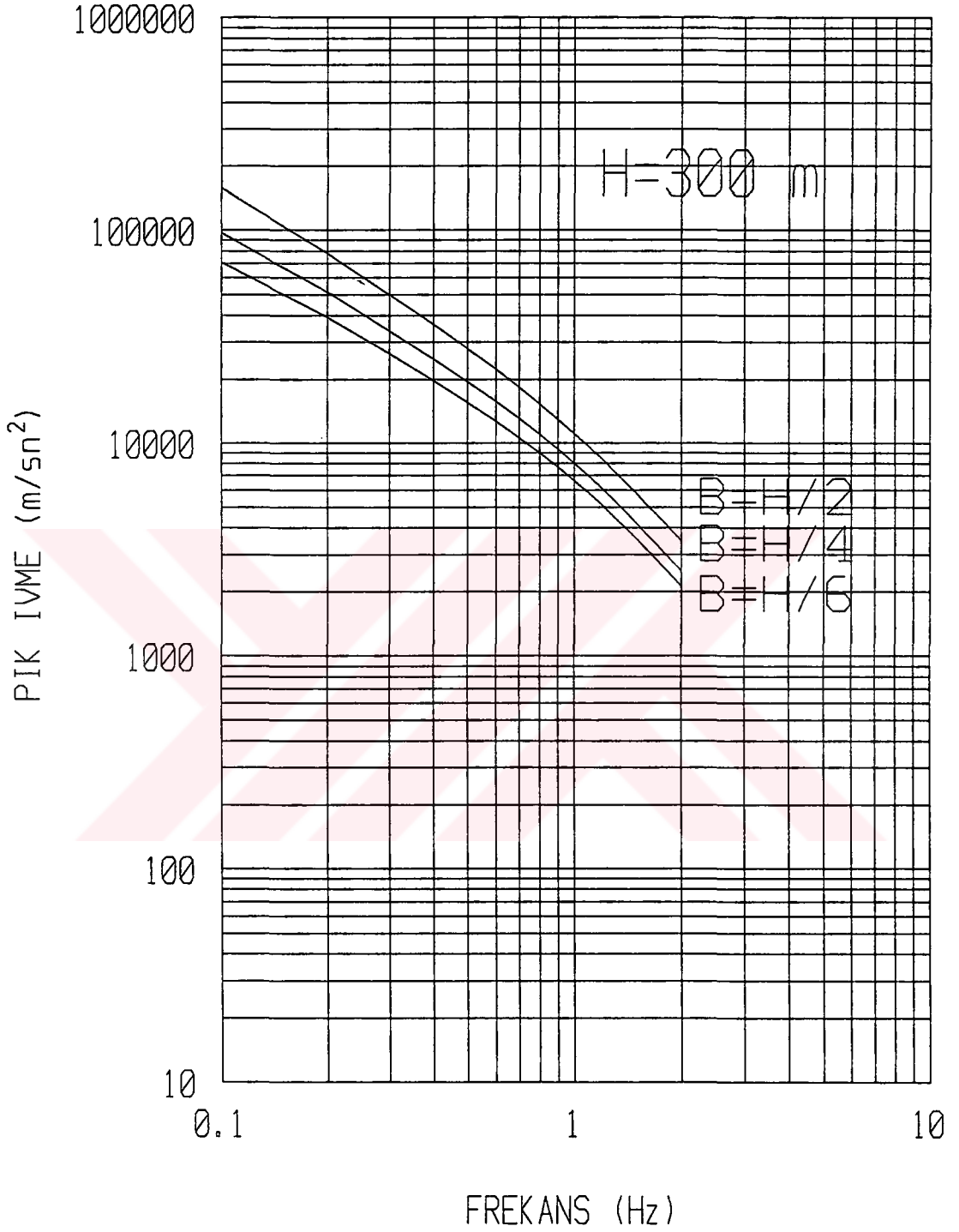
Şekil 7-21. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 300m$.)



Şekil 7-22. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m}$.)

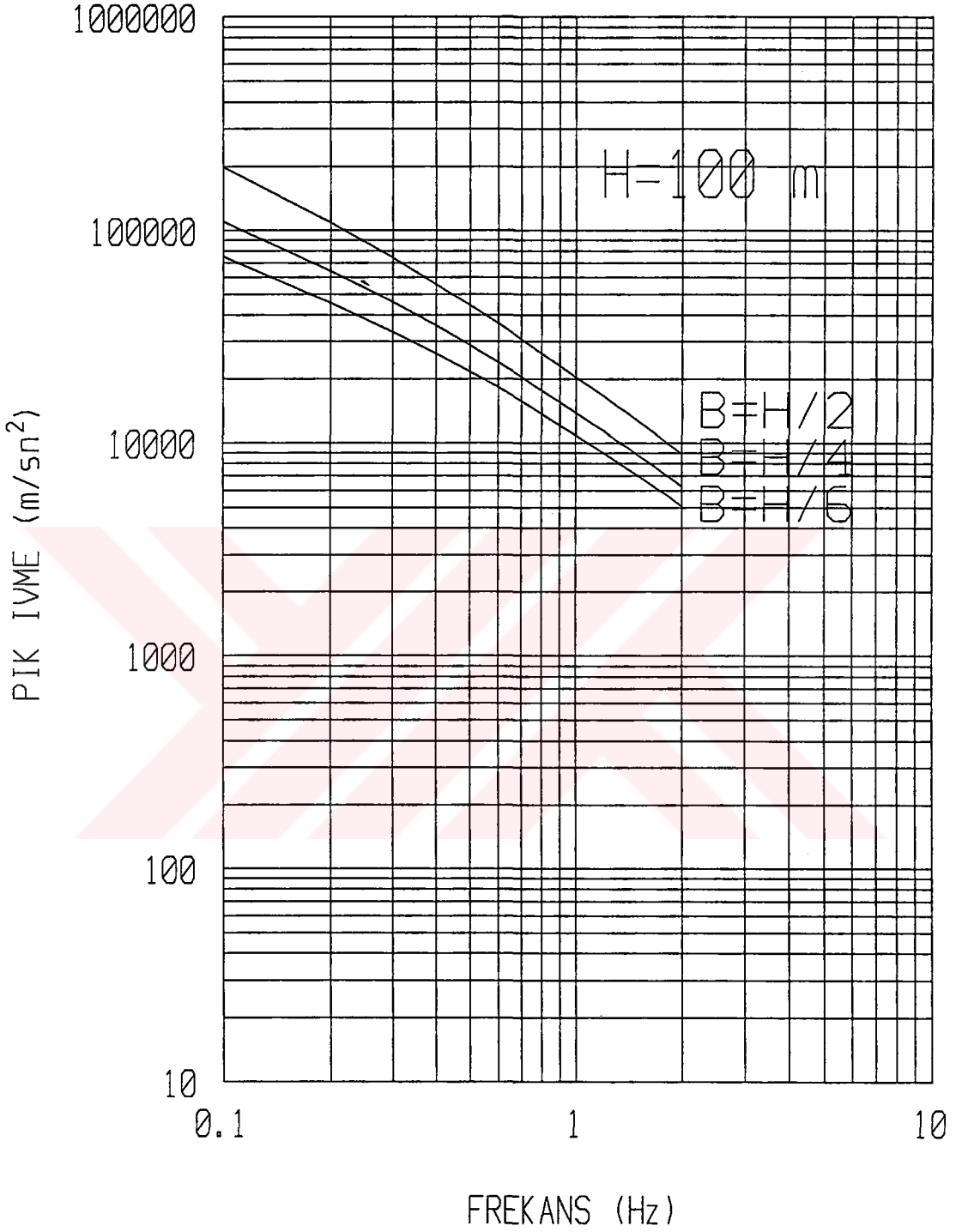


Şekil 7-23. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 80\text{ km/saat}$, $H = 200m$.)

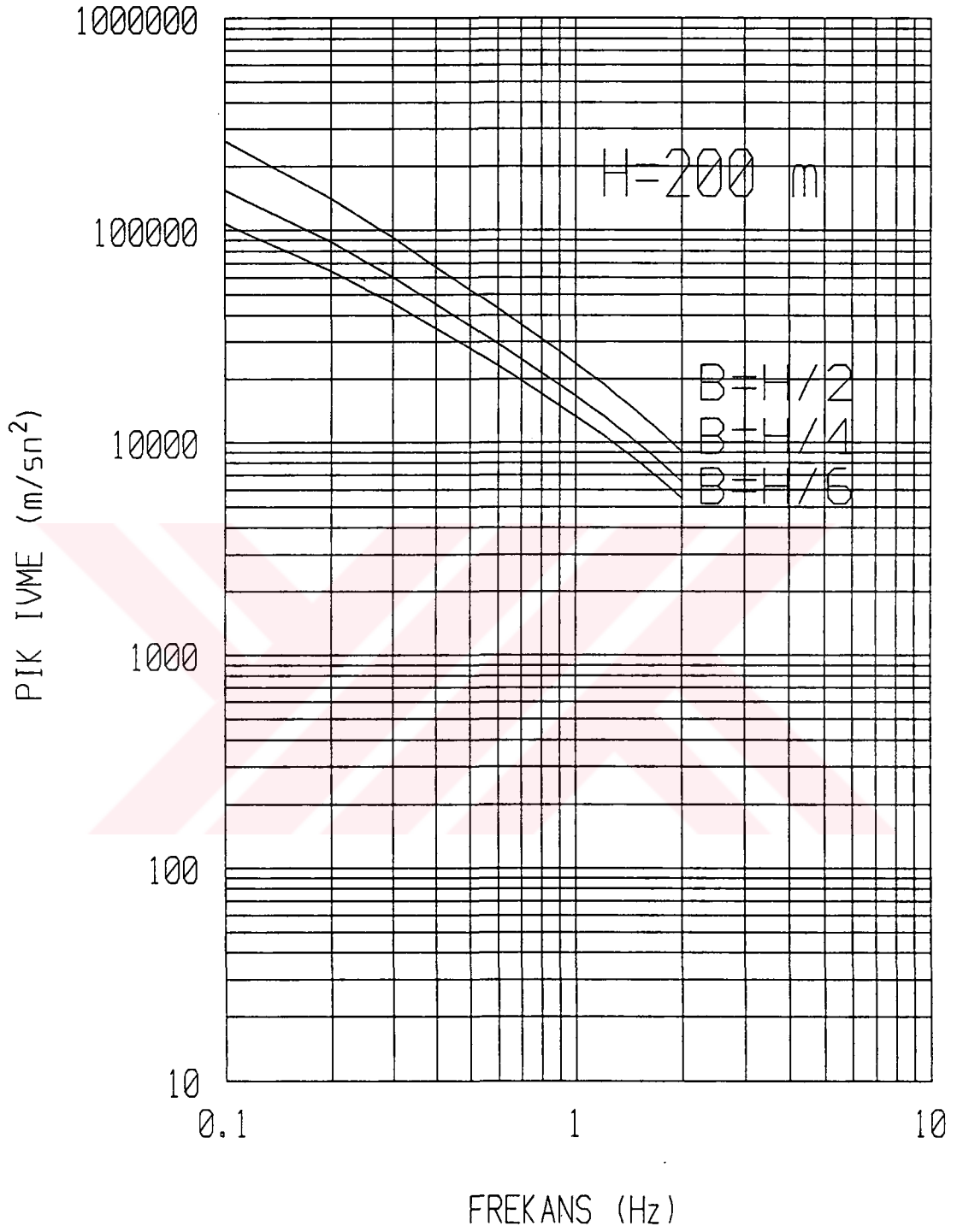


Şekil 7-24. Referans yapı için ivme cevap spektrumu

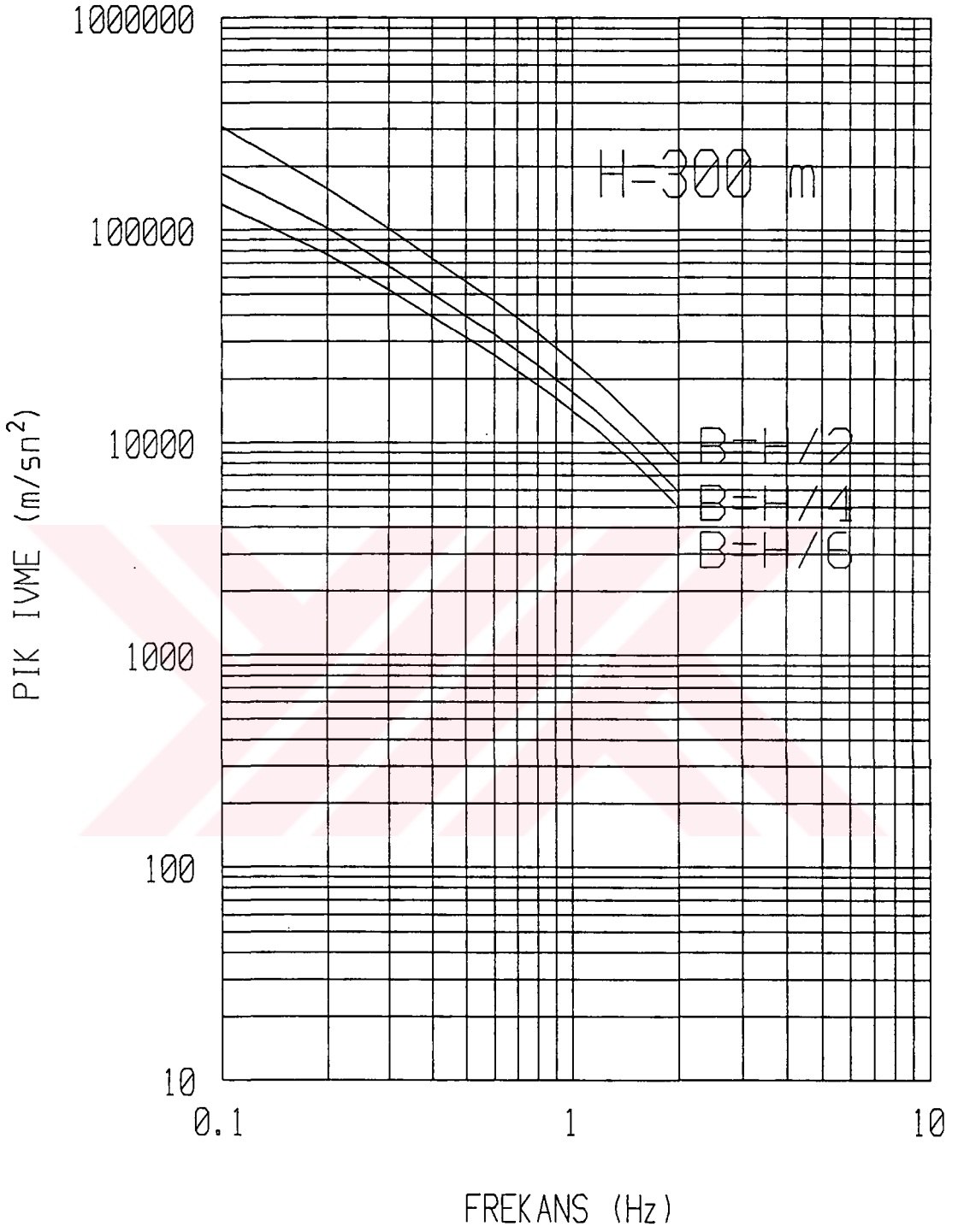
(Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)



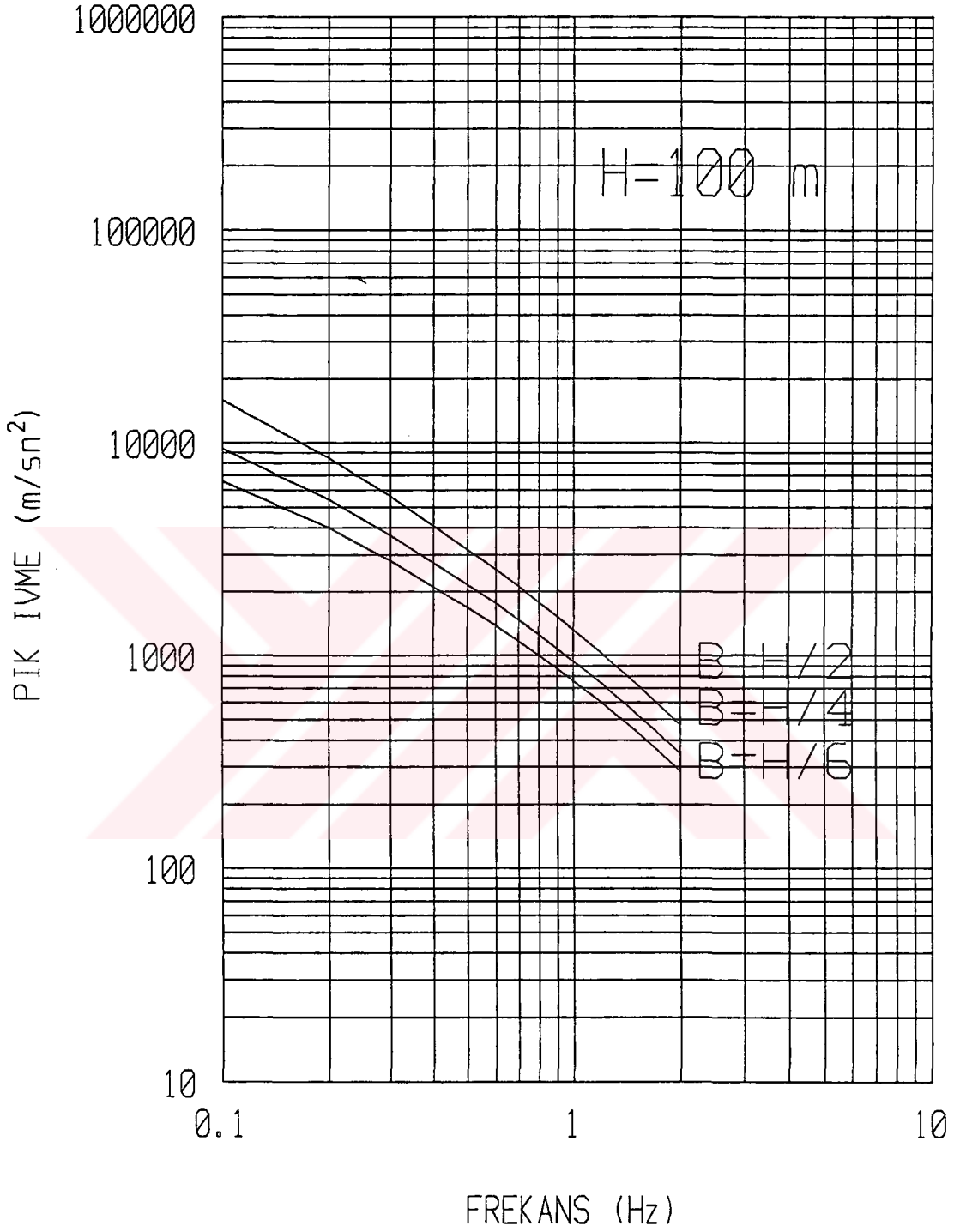
Şekil 7-25. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.02, $V_{o(10)} = 100 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m}$.)



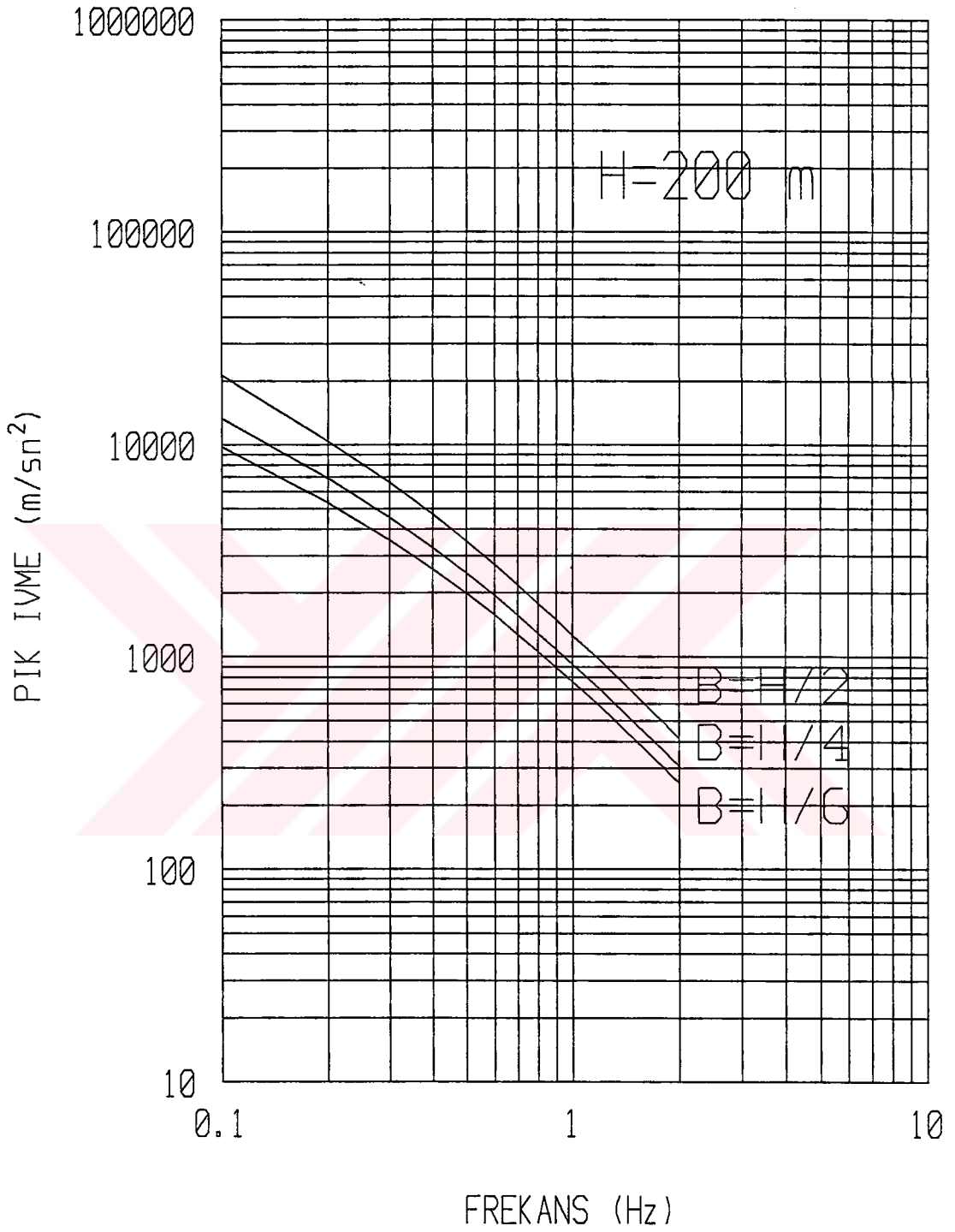
Şekil 7-26. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
(Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)



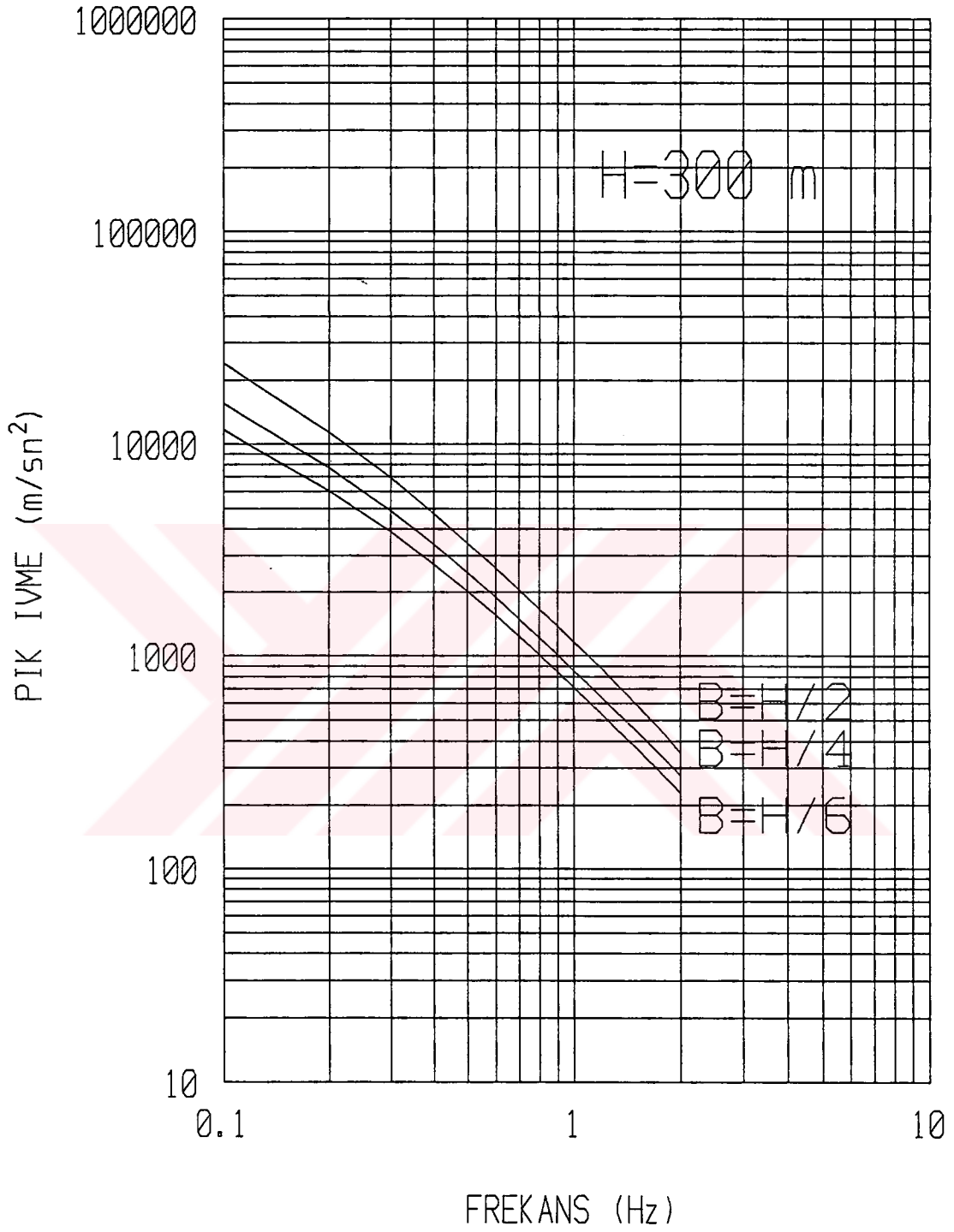
Şekil 7-27. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
(Sönüm = 0.02, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)



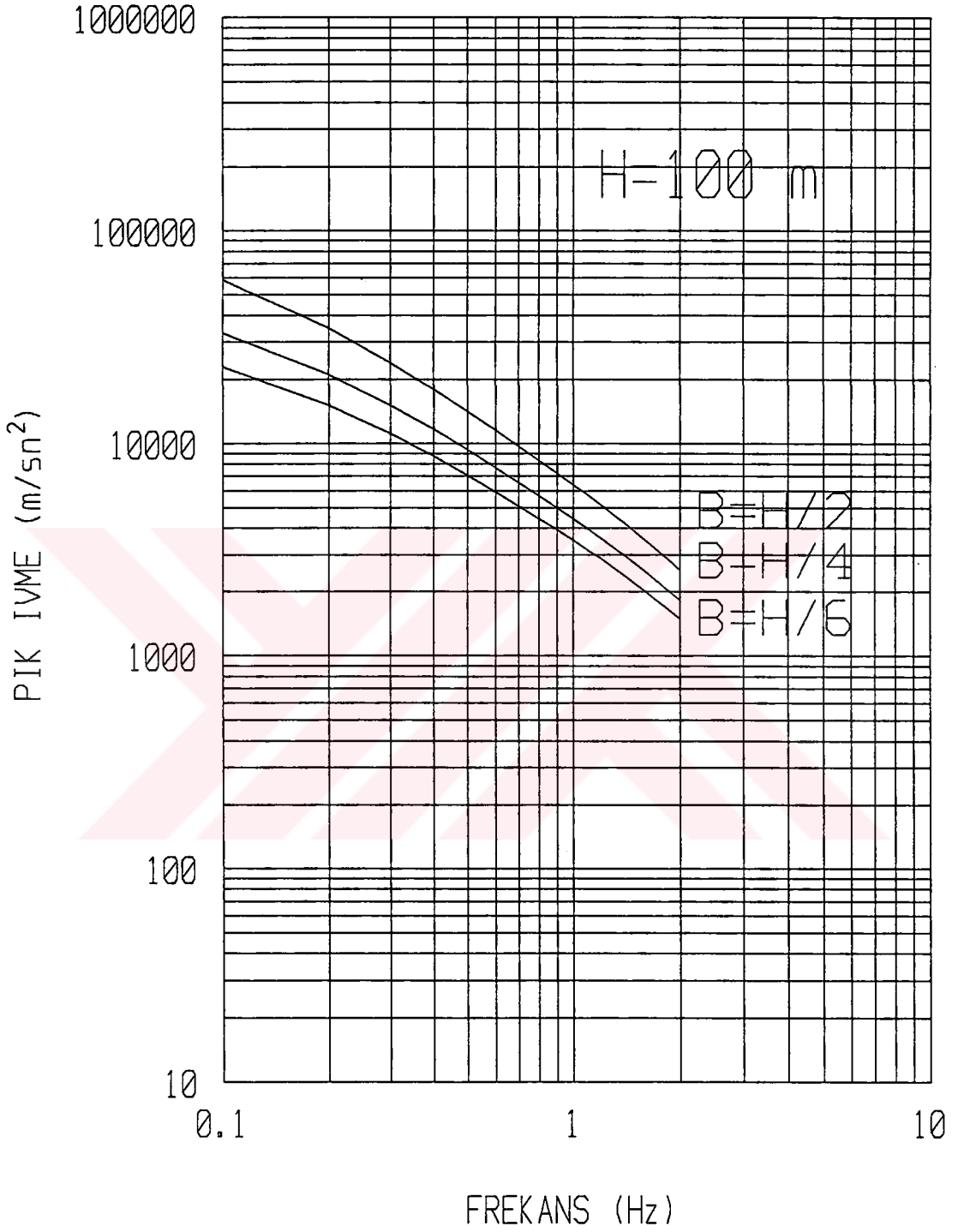
Şekil 7-28. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)



Şekil 7-29. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_{o(10)} = 50 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)

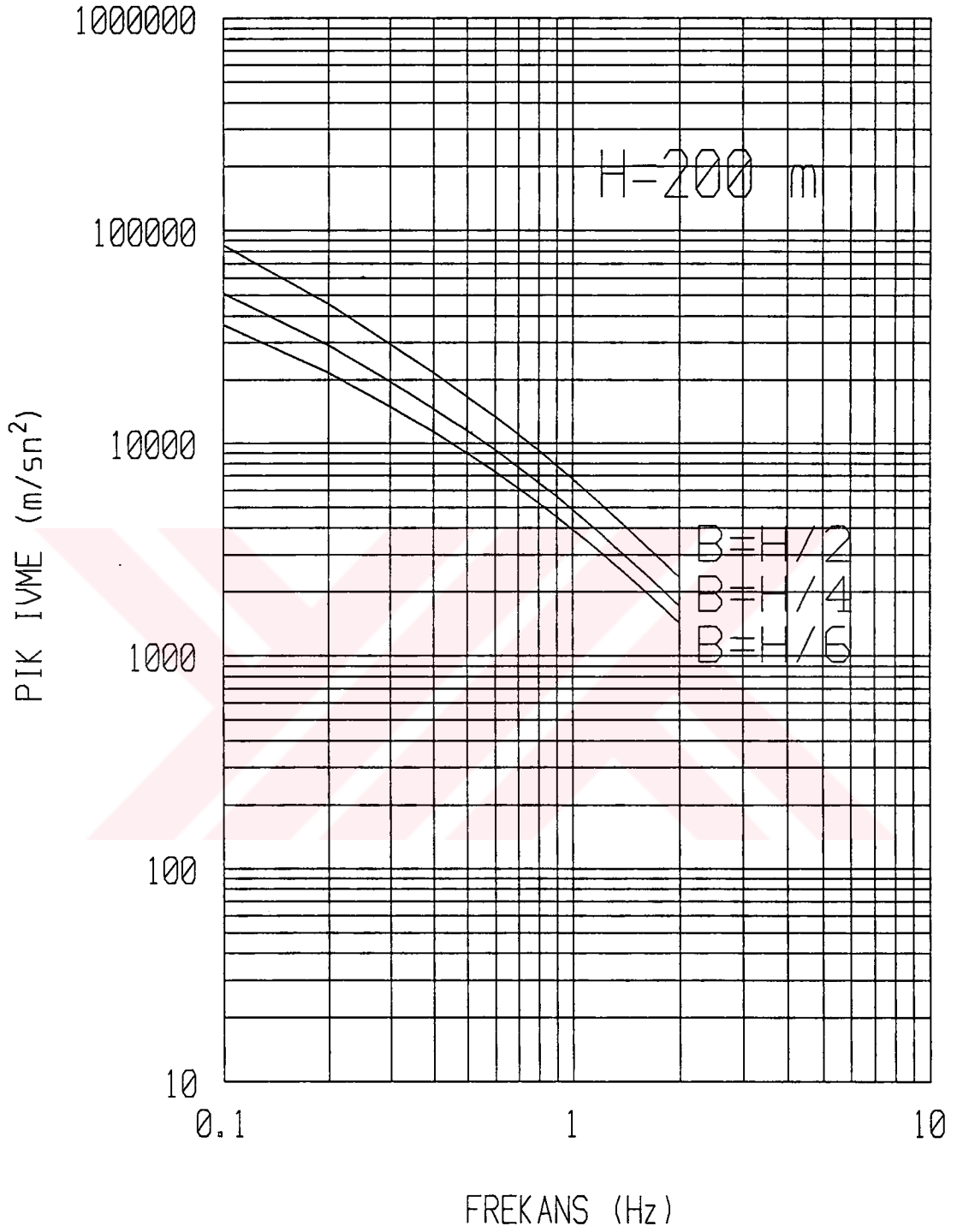


Şekil 7-30. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 50 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)

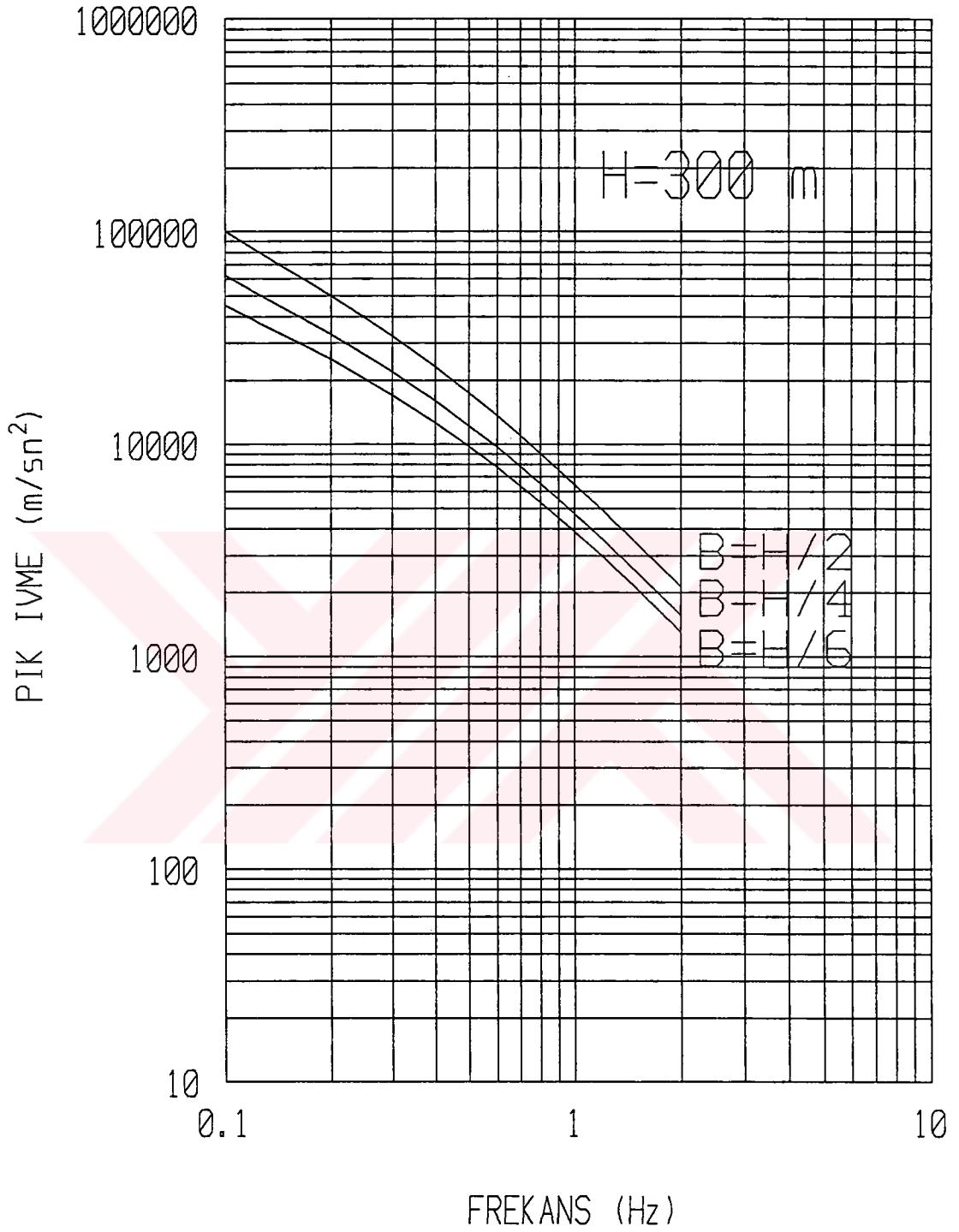


Şekil 7-31. Referans yapı için ivme cevap spektrumu

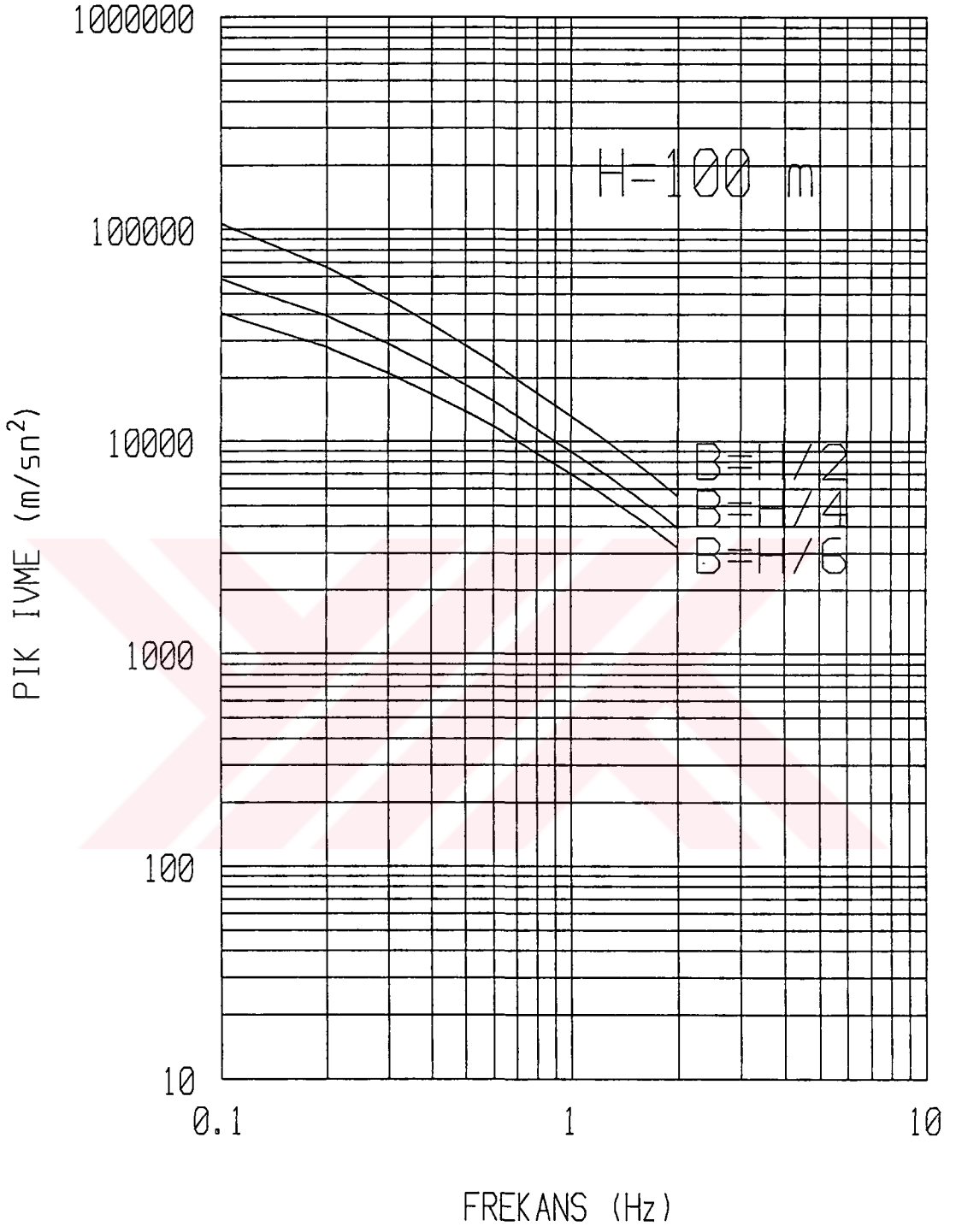
(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)



Şekil 7-32. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m}$.)

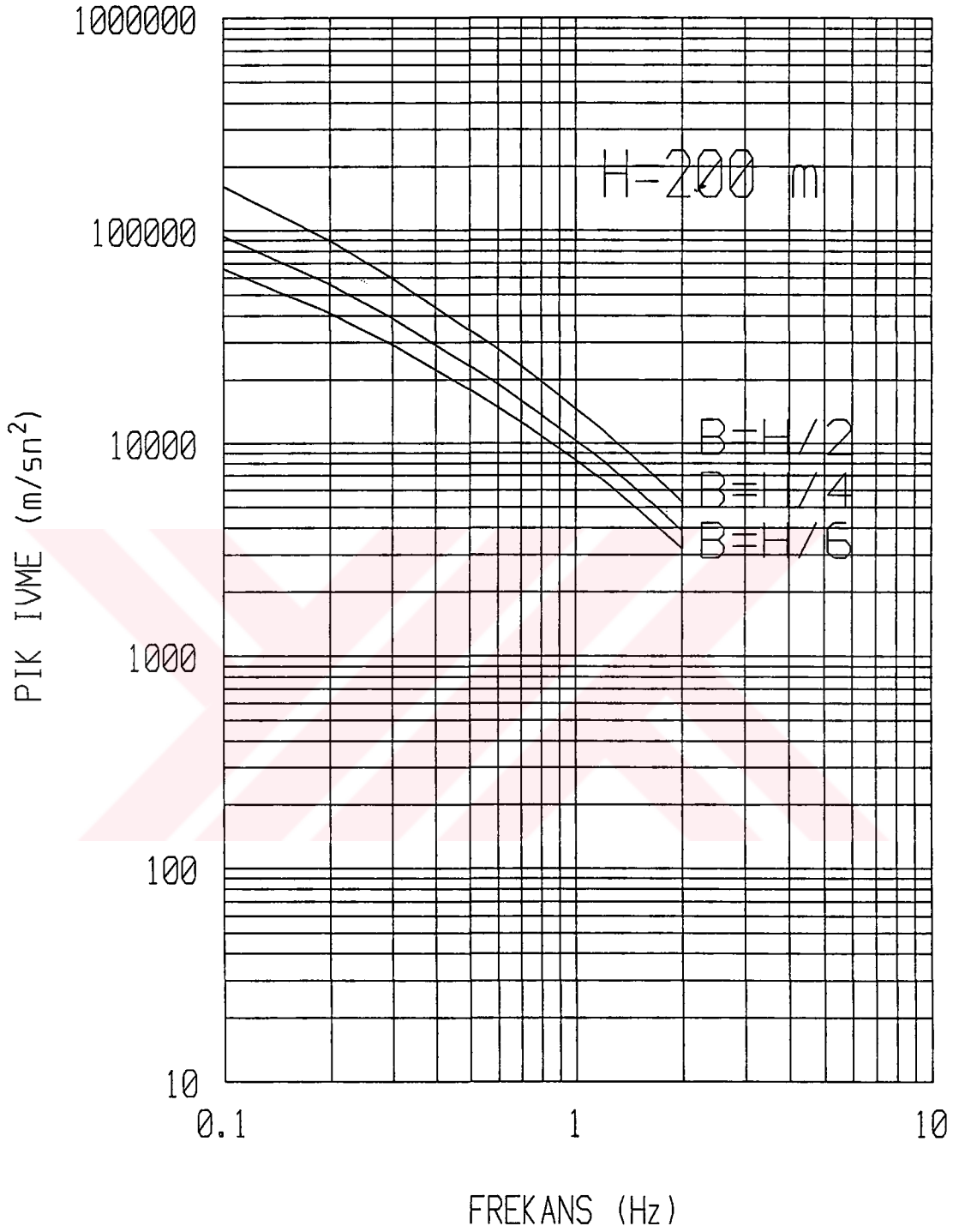


Şekil 7-33. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 80 \text{ km/saat}$, $H = 300\text{m.}$)



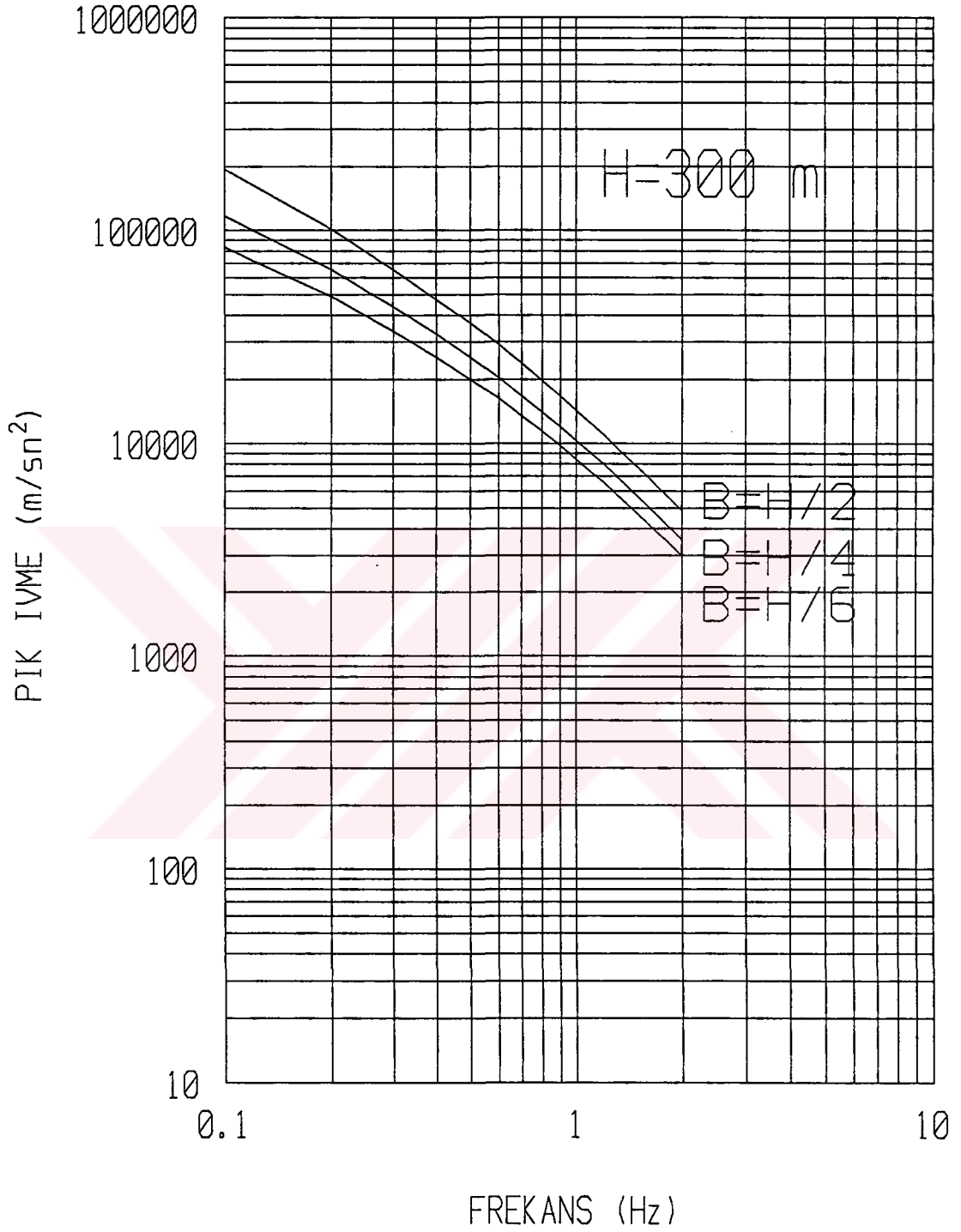
Şekil 7-34. Referans yapı için ivme cevap spektrumu

(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 100\text{m.}$)



Şekil 7-35. Referans yapı için ivme cevap spektrumu

(Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 200\text{m.}$)

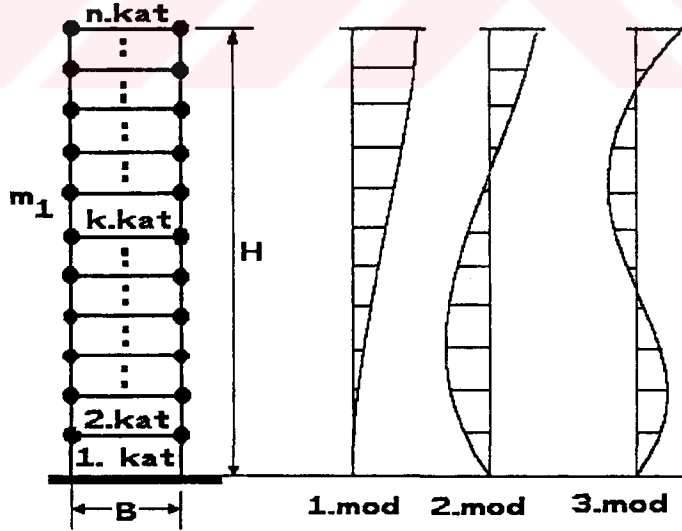


Şekil 7-36. Referans yapı için ivme cevap spektrumu
 (Sönüm = 0.05, $V_o(10) = 100 \text{ km/saat}$, $H = 300m$.)

BÖLÜM 8

AYRIK SİSTEMLER İÇİN MODAL KATKI VEYA DÜZELTME FAKTÖRLERİNİN HESABI

Bölüm 6' da, yüksek yapıların, rüzgarın esiş yönündeki etkilerine karşı, yine aynı yöndeki deplasman ve ivme cevabının, cevap spektrumu yöntemiyle nasıl hesaplanabileceği açıklanmıştı. Ancak, sözkonusu bölümde elde edilen ifadeler, kütle ve rijitlik gibi yapısal parametrelerin yapı yüksekliğince sürekli olarak dağıldığı kabulü ile çıkarılmışlardır. Ayrıca kütle değerinin dağılımının üniform olduğu da yapılan kabuller arasındadır. Bu son kabul uygulama ile çok ters düşmemektedir. Çünkü, yüksek yapılarda katların fonksiyonları düzenlenirken birbirlerinden çok farklı kütle yapısına sahip olmalarını gerektiren bir düzenleme yapmak alışılmış bir davranış değildir.



Şekil 8-1. Bir yüksek yapının mod şekilleri

Yapıların projelendirilmesi sırasında, yapısal parametrelerin yapı yüksekliğince sürekli olduğu kabulüne dayanarak kapalı çözümler yapmak, her çeşit yapıya uygulanabilir, genel ifadeler üretmek, oldukça karmaşık matematik işlemler gerektirmesi ve en önemlisi bilgisayara programlamaya uygun olmaması gibi

nedenlerle proje mühendisleri tarafından tercih edilmemektedir. Özellikle bilgisayarın yapı analizi çalışmalarına girmesinden sonra nümerik bir teknik olan matris deplasman yöntemi bu tip hesaplamalarda en çok kullanılan yöntem olmuştur. Bu yöntem, yapının gerçekte sürekli olan parametrelerini önceden seçilen düğüm noktalarında toplanmış olarak kabul eder. Bu nedenle, bir yüksek yapının analizi sırasında bu noktalar kat hizalarında alınır, yapının kütlelerinin bu noktalarda toplandığı varsayılacak ve bu noktalar arasında kalan yapı parçasının rijitliği ile ilgilenilecektir (Şekil 8-1). Bu noktaların toplam hareket edebilme serbestlikleri sayısı “serbestlik derecesi” olarak isimlendirilir. Bu çalışmanın kapsamı içinde sadece yatay serbestlik dereceleri ile ilgilenildiğinden ve kat kirişlerinin eksenel rijitliklerinin sonsuz kabul edilmesi nedeniyle yapının toplam serbestlik sayısı kat sayısına eşit olacaktır.

Bu şekilde yapısal parametreleri ayrık formda olduğu varsayılan lineer elastik bir sistem için genel hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{y}(t)\} + [C]\{\dot{y}(t)\} + [K]\{y(t)\} = \{F(t)\} \dots \dots \dots (8.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla yapının kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri, $\{y(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ ise zamana bağlı deplasman ve dış yük vektörleridir. Bu denklemden sönüm ve yük matrisi için $[C] = 0$ ve $\{F(t)\} = 0$ kabulü yapılırsa (8.1) denklemi,

$$[M]\{\ddot{y}(t)\} + [K]\{y(t)\} = 0 \dots \dots \dots (8.2)$$

şekline gelir. Bu denklemin özdeğer ve özvektörleri sırasıyla yapının serbestlik sayısı kadar doğal frekans ve mod şekli vektörüne karşılık gelir.

$$\{\mu_1\} = \begin{Bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{12} \\ \vdots \\ \mu_{1n} \end{Bmatrix} \quad \{\mu_2\} = \begin{Bmatrix} \mu_{21} \\ \mu_{22} \\ \vdots \\ \mu_{2n} \end{Bmatrix} \quad \{\mu_3\} = \begin{Bmatrix} \mu_{31} \\ \mu_{32} \\ \vdots \\ \mu_{3n} \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (8.3)$$

(8.3) ifadeleriyle yazılmış olan mod şekil vektörlerinin herbirisinin terim sayısı yapının serbestlik sayısı kadar olup her terim yapıya ait belli bir yükseklikteki modal deplasmanı verir (Şekil 8-1).

(8.1) denkleminin modal analiz yöntemiyle çözümü Bölüm 1.4.1.3' de açıklanmıştır. Bu yöntemle göre (8.1) denkleminde, sözkonusu bölümde verilen (1.45) ifadesi uygulanarak, bu denklem serbestlik sayısı kadar birbirinden bağımsız modal hareket denkleminde indirgenmektedir. Bu denklemlerden i . moda karşı gelen hareket denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$M_i^* \ddot{q}_i(t) + C_i^* \dot{q}_i(t) + K_i^* q_i(t) = F_i^*(t) \quad \dots \dots \dots (8.4)$$

Burada M_i^* , C_i^* , K_i^* ve $F_i^*(t)$ sırasıyla i . moda ait genelleştirilmiş kütle, sönüm oranı, rijitlik ve dış kuvvet değerleridir ve ifadeleri (1.46), (1.47), (1.48) ve (1.49)' da verilmiştir. $q_i(t)$ ise i . moda ait genelleştirilmiş koordinat olup, bundan yararlanarak yapının toplam deplasmanı, yapının l adet modu dikkate alınarak şu şekilde hesaplanır.

$$y_k(t) = \sum_{i=1}^l \mu_{ik} q_i(t) \quad \dots \dots \dots (8.5)$$

Cevap spektrumu yöntemi kullanılarak, yapının üzerine rüzgarın esiş yönünde etkiyen rüzgar kuvvetleri nedeniyle oluşan deplasman ve ivmelerin hesaplanabilmesi için ilk olarak yapının doğal frekans ve mod şekli vektörlerinin hesaplanması gerekir. Bunun için (8.2) serbest titreşim ifadesi ele alınarak yaygın olarak kullanılan sayısal yöntemlerden birisine başvurmak yeterlidir. Ayrıca, bugün birçok proje bürosunda kullanılan, sonlu eleman bazlı herhangi bir program aracılığı ile de doğal frekans ve mod şekli vektörlerinin saptanması mümkündür.

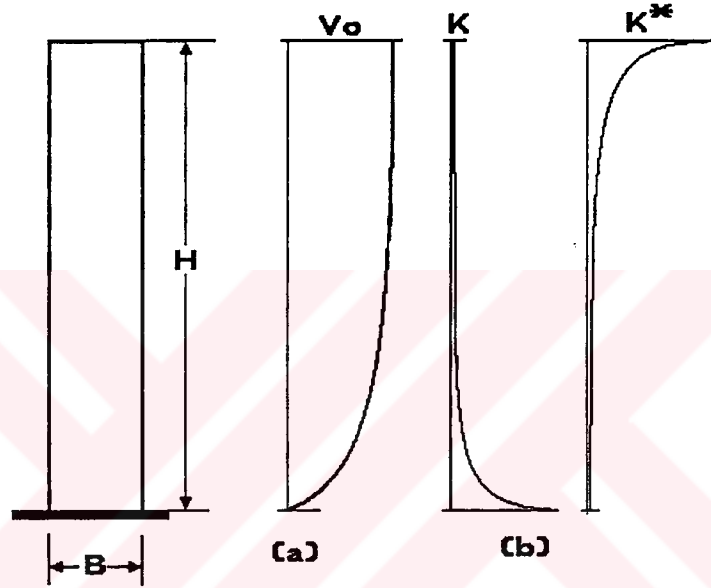
Bölüm 6' da ifadeleri verilen modal katkı veya düzeltme faktörlerinin içinde genelleştirilmiş kütle ifadesi kullanılmaktadır. Bu ifadenin matris formundaki yazılışı şöyledir;

$$M_i^* = \{\mu_i\}^T [M] \{\mu_i\} \quad \dots \dots \dots (8.6)$$

Bu çalışmada geliştirilmiş olan yöntemde sonuçlar modal kütlelerin değerine oldukça bağımlıdır. Bu nedenle son katın kütlelerinin yarım olarak alınmaması halinde sonuçlarda önemli hatalar ortaya çıkabilmektedir. Böylece, m_k k . katın kütlesi ise, genelleştirilmiş kütle değeri,

$$M_i^* = m_k \{\mu_i\}^T \{\mu_i\} = \sum_{k=1}^n \Psi(k) m_k \mu_{ik}^2 \dots\dots\dots (8.7)$$

olarak hesaplanacaktır. Burada k kat numarasını göstermektedir. $\Psi(k)$ fonksiyonu ise $k = n$ halinde $\Psi(n) = 0.5$, k nın diğer bütün değerlerinde $\Psi(k) = 1$ olan özel bir fonksiyondur ve kütlenin son katta yarım olarak ifadeye girmesini sağlamak üzere ilave edilmiştir.



Şekil 8-2. a.) Rüzgar profili

b.) Koherans fonksiyonunun K ve K^* değerlerinin yükseklikle değişimi

Yapılara etkiyen rüzgar hızının statik bileşeni için bu çalışma içinde logaritmik kural ifadesinin kullanıldığından sözedilmiş ti. Bu ifade,

$$V_o(z) = V_o(z_r) \frac{\ln z/z_o}{\ln z_r/z_o} \dots\dots\dots (8.8)$$

şeklindedir (Şekil 8-2a). Buradaki z_r referans yüksekliği için 10 m. ve yapının şehir merkezinde olduğu varsayılarak, cevap spektrumu eğrilerini hazırlarken yapı olduğu gibi, z_o pürüzlülük uzunluğu için 0.5 alınrsa, bu ifade,

$$V_o(z) = \frac{V_o(10)}{\ln 20} \ln 2z \quad \dots \dots \dots (8.9)$$

şeklini alır. n katlı bir yapıda, k . kat yüksekliğindeki rüzgar hızı profilinin değerini bulabilmek için,

$$V_{ok} = \frac{V_o(10)}{\ln 20} \ln \left(2H \frac{k-1}{n-1} \right) \quad \dots \dots \dots (8.10)$$

ifadesi kullanılabilir.

Rüzgar yükünün statik bileşeni nedeniyle yapıda oluşan etki, herhangi bir statik analiz yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. Ayrıca bu etki Bölüm 4.2' de açıklanmış olan, modal analiz yöntemine göre elde edilmiş (4.18) ifadesi kullanılarak da hesaplanabilir. Bu ifadede de modal kütle ifadesinde karşılaşılan duruma benzer şekilde sonuç içindeki integral terimine kuvvetli şekilde bağlıdır. Bu nedenle (4.18) ifadesinin ayrık formda yazılması sırasında integralin trapez kuralına göre hesaplanabilmesi için (8.11) ifadesinde tanımlanan $\Psi(k)$ yardımcı fonksiyonu kullanılmıştır. Böylece yapının tepe noktasının statik deplasmanını veren ifade şu şekildedir.

$$y_i(H) = \mu_{in} \frac{B\rho C_D h \sum_{k=1}^n \Psi(k) \mu_{ik} V_{ok}^2}{8\pi^2 f_i^2 M_i^*} \quad \dots \dots \dots (8.11)$$

Bu ifadede n indisi yapının en üst katını, k arada herhangi bir katı, h ise kat yüksekliğini göstermektedir.

Rüzgarın yapı üzerine, esiş yönünde yaptığı dinamik etki nedeniyle yapının tepesinde oluşan en büyük deplasman ve ivmenin hesaplanabilmesi için ise ilk olarak modal katkı veya düzeltme faktörlerinin hesaplanması gerekir. Bu katsayılar, hesaplamak istediğimiz yapının dinamik rüzgar etkilerine cevabı ile, aynı doğal frekans, sönüm oranı, yükseklik ve genişliğe sahip olmasına rağmen, birim kütleli ve mod şekli doğrusal olan bir referans yapının aynı karekterdeki etkilere cevabı arasındaki orandır. Gerek modal katkı veya düzeltme faktörlerinin ifadeleri, gerekse 7. bölümdeki cevap spektrumu eğrileri hazırlanırken en büyük sonucu vermesi nedeniyle yapıların tepesindeki deplasman ve ivme değerleri dikkate

yatınmek olanaksızdır. Çünkü yüksek modların ivme değerleri üzerine etkisinin %20' ye varan oranlarda olduğu 2. bölümde sözedilen kaynaklarca belirtilmiştir. Bu durumda, yüksek modlar için de doğru ivme değerinin hesaplanabilmesi amacıyla geliştirilmiş olan ve (6.45) ile verilen ifadeyi kullanmak gerekmektedir. Bu ifadenin ayrıık şekle getirilmiş hali şu şekildedir.

$$k_{ai}(H) = \frac{\mu_{in}}{\mu_m} \frac{M_r^*}{M_i^*} \left[\frac{2 \left(\sum_{k=1}^n \mu_{ik} V_{ok} K \left(\sum_{s=1}^k \mu_{is} V_{os} K^* \right) \right) - \left(\sum_{k=1}^n \mu_{ik} V_{ok} \right)^2}{2 \left(\sum_{k=1}^n \mu_{rk} V_{ok} K \left(\sum_{s=1}^n \mu_{rs} V_{os} K^* \right) \right) - \left(\sum_{k=1}^n \mu_{rk} V_{ok} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.16)$$

Burada k . kat için,

$$K = \exp \left[\frac{-f C_z H}{V_o(10)} \cdot \frac{k-1}{n-1} \right] \dots \dots \dots (8.17)$$

$$K^* = \exp \left[\frac{f C_z H}{V_o(10)} \cdot \frac{s-1}{n-1} \right] \dots \dots \dots (8.18)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu ifadede ise, C_z korelasyon katsayısı olup $C_z = 6$ olarak alınacaktır. Diğer parametreler ise, daha önce kullanıldıkları gibidir.

Böylece hesaplanan modal katkı veya düzeltme katsayıları, gerçek yapı ile aynı boyutlara, aynı doğal frekansa ve sönüm oranına sahip, dinamik rüzgar etkisi altındaki referans yapı için Şekil 7-1 den Şekil 7-12 ye kadar verilmiş olan spektrum eğrilerinden yararlanılarak bulunacak deplasman ve ivme değerleri ile çarpılarak gerçek yapının aynı karekterdeki dinamik rüzgar etkisine modal cevabı hesaplanır ((6.32), (6.34)). Daha sonra her mod için pik deplasman ve ivme değerlerinin farklı zamanlarda oluşabileceği düşüncesi ile (6.33) ifadesiyle verildiği gibi elde edilen modal cevapların kareleri toplamının karekökü alınarak yapının toplam cevabı hesaplanır.

$$\max_t y(H,t) = \left[\sum_{i=1}^l k_i^2(H) D^2(f_{oi}) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (8.19)$$

$$\max_t a(H,t) = \left[\sum_{i=1}^l k_i^2(H) A^2(f_{oi}) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (8.20)$$



BÖLÜM 9

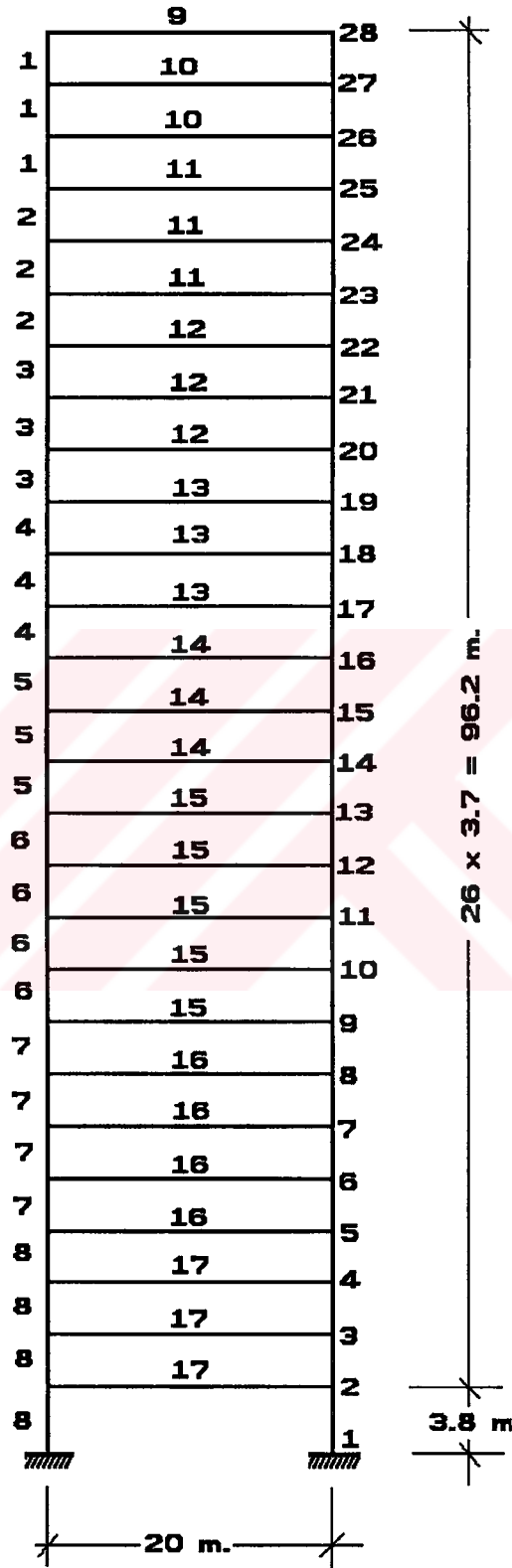
SAYISAL UYGULAMA

Bu bölümde, 6. bölümde ifadeleri elde edilen ve 8. bölümde yapının parametrelerinin ayrık kabul edilmesi halinde nasıl uygulanacağı açıklanmış olan rüzgar spektrumu yönteminin, özellikleri gerçeğe uygun bir yapıya uygulanması amaçlanmıştır.

Bu nedenle Anderson ve Bertero' nun 1969 yılında yayınlanmış bir çalışmasında [51] emniyet gerilmesi yöntemine göre dizayn edilmiş olan yapılardan birisi ele alınmış, 20 adet olan kat sayısı uygun boyutta kolon ve kiriş elemanlar ilave edilerek 28 kata çıkartılmıştır. Türetilen bu yapı 100 m. yüksekliğinde olup rüzgar cephesi 25 m., diğer boyutu ise 20 m. dir.

Bu sistem Şekil 9-1' de şematik olarak gösterilmiş, kullanılan elemanların isimleri ve özellikleri ise Tablo 9-1 de verilmiştir. Yapının kütlesi ise her katta eşit ve yukarıda sözedilen kaynakta hesaplanan yapılar için kabul edilen kütle değerlerine benzer olarak $m_1 = 43812 \text{ kg}$ olarak alınmıştır. Bu değer, yapı boyunca üniform olarak düşünülürse $m = 11841 \text{ kg/m}$ değerine karşı gelmektedir.

Bu yapı COSMOS isimli [52] ve sonlu eleman bazlı bir bilgisayar programı ile analiz edilmiş ve bu şekilde elde edilen beş adet doğal frekans ve mod şekli vektörüne ait değerler Tablo 9-2 ve 9-3 de özetlenmiştir. Daha sonra her kat hizasında hesaplanan bu mod şekli vektörü değerleri daha sonraki hesaplamalar sırasında daha az nümerik işlem yapmak amacıyla direkt olarak kullanılmamış ve yapı yüksekliğince eşit aralıklı seçilen 15 adet noktadaki değerleri kullanılmıştır.



Şekil 9-1. Örnek yapının şematik gösterilimi.

Tablo 9-1. Örnek yapıda kullanılan kesit tipleri ve özellikleri.

Kesit Tipi	Görevi	Adı	Alan (cm^2)	Atalet Momenti (cm^4)
1	Kolon	14WF61	115.50	26680
2		14WF111	210.90	52860
3		14WF136	258.00	66180
4		14WF176	333.50	89490
5		14WF237	449.60	128200
6		14WF287	544.50	162750
7		14WF270	703.20	226850
8		14WF500	948.40	343390
9	Kiriş	18WF45	85.16	29390
10		21WF62	118.06	55360
11		24WF76	144.52	87410
12		27WF84	160.00	117790
13		30WF99	187.74	166490
14		30WF116	220.64	205200
15		30WF124	235.48	223100
16		30WF172	327.10	329240
17		30WF210	399.35	411650

Tablo 9-2. Örnek yapıya ait doğal frekans değerleri (Hz)

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
0.18195	0.45967	0.76879	1.07479	1.41703

Tablo 9-3. Örnek yapının ilk beş moduna ait mod şekli vektörleri.

Kat	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0159	-0.0443	-0.0794	-0.1164	0.1499
3	0.0466	-0.1289	-0.2287	-0.3301	0.4161
4	0.0830	-0.2273	-0.3965	-0.5584	0.6794
5	0.1237	-0.3339	-0.5683	-0.7715	0.8889
6	0.1697	-0.4494	-0.7380	-0.9486	1.0033
7	0.2175	-0.5617	-0.8792	-1.0467	0.9720
8	0.2672	-0.6689	-0.9828	-1.0511	0.7904
9	0.3224	-0.7763	-1.0465	-0.9503	0.4577
10	0.3854	-0.8843	-1.0597	-0.7315	-0.0045
11	0.4499	-0.9763	-1.0078	-0.4193	-0.4816
12	0.5139	-1.0470	-0.8924	-0.0544	-0.8712
13	0.5770	-1.0943	-0.7202	0.3215	-1.0983
14	0.6417	-1.1166	-0.4886	0.6789	-1.1085
15	0.7059	-1.1105	-0.2153	0.9592	-0.8802
16	0.7689	-1.0756	0.0794	1.1225	-0.4589
17	0.8362	-1.0036	0.4052	1.1349	0.1290
18	0.9044	-0.8946	0.7199	0.9693	0.7221
19	0.9709	-0.7523	0.9843	0.6435	1.1444
20	1.0427	-0.5557	1.1883	0.1401	1.2663
21	1.1160	-0.3137	1.2840	-0.4407	0.9880
22	1.1853	-0.0467	1.2373	-0.9479	0.3717
23	1.2546	0.2601	1.0159	-1.2813	-0.4581
24	1.3201	0.5841	0.6315	-1.3169	-1.1637
25	1.3777	0.8936	0.1382	-1.0117	-1.4163
26	1.4344	1.2266	-0.5322	-0.2408	-0.9056
27	1.4812	1.5155	-1.2024	0.7554	0.2549
28	1.5155	1.7292	-1.7359	1.6545	1.5227

Bu yapıya etkiyen rüzgar hızı olarak $V_o = 50 \text{ km/saat}$ alınmıştır. Bu hıza karşı gelen rüzgar profili de yine yapı yüksekliğince eşit aralıklı 15 noktada hesaplanan değerleri ile tanımlanmıştır. Yapının rüzgar cephesi genişliği $B = 25 \text{ m.}$, kat yüksekliği $h = 3.7 \text{ m.}$, havanın yoğunluğu $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ve $C_D = 1.3$ olarak alınmıştır. Yapıya ait sönüm oranının ise 0.02 olduğu varsayılmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen ifadeler bu yapıya uygulanmadan önce, aynı yapı 4. Bölümde açıklanan yöntemle göre kodlanmış, kesin sonuç veren bir bilgisayar programı ile çözülmüş ve her moda ait statik deplasman, dinamik deplasman, ve ivme değerleri Tablo 9-4 de verilmiştir. Ayrıca yüksek modların sonuca etkisini göstermek üzere aynı programla önce ilk iki mod, daha sonra da ilk üç mod ve daha yukarısı için çözüm yapılmış ve Tablo 9-5 de yüksek modların sonuca katkısı yüzde cinsinden gösterilmiştir.

Tablo 9-4. Örnek yapıya ait gerçek statik deplasman, dinamik deplasman ve ivme değerleri.

	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
Statik Deplasman m	0.9901	-0.0522	0.0056	-0.0037	0.0005
Dinamik Deplasman m	1.0849	0.0857	0.0179	0.0077	0.0018
İvme (m/sn^2)	0.7977	0.3344	0.1750	0.1070	0.0674

Tablo 9-5. İlk beş modu hesaba katarak elde edilen sonuca göre, daha az mod alarak hesap yapılması halinde ortaya çıkan rölatif hata miktarları.

	1. Mod	1. + 2. Mod	1. + 2. + 3. Mod	1. + 2. + 3. + 4. Mod	1. + 2. + 3. + 4. + 5. Mod
Statik Deplasman m	0.9901	0.9380	0.9435	0.9398	0.9403
Rölatif Hata (%)	5.3	0.25	0.35	0.05	0.00
Dinamik Deplasman m	1.0849	1.0886	1.0888	1.0889	1.0889
Rölatif Hata (%)	0.37	0.03	0.00	0.00	0.00
İvme (m/sn^2)	0.7977	0.8717	0.8985	0.9141	0.9198
Rölatif Hata (%)	13.3	5.3	2.3	0.62	0.00

İlk olarak (8.11) ifadesi kullanılarak rüzgarın bu yapı üzerinde oluşturduğu statik etki hesaplanmıştır. Birinci mod için bu değer;

$$y_1(H) = 0.9903m.$$

şeklinde elde edilmiştir. (8.11) ifadesinin elde edilmesinde kullanılan (4.18) ifadesinin içinde bulunan integralin toplam formunda hesaplanması nedeniyle bir miktar hata yapılmaktadır. Tablo 9-5 de verilen daha kesin statik deplasman değeri ile bu son elde edilen değer karşılaştırılırsa bu rölatif hatanın %1 den az olduğu görülebilir. Bu değer sadece birinci mod için hesaplanması yeterlidir. Sadece birinci mod için hesaplanan statik deplasmanda yapılan hata, güvenli tarafta ve %5.3 olarak elde edilmiştir. Hatta bu birinci modun şeklini doğrusal olarak da almak mümkündür. Bu durumda gerçek mod şekline göre %1 civarında farklı değer elde edilmektedir.

Rüzgarın dinamik karakterinin yapıda oluşturduğu deplasman ve ivmelerin hesaplanabilmesi için atılması gereken ilk adım, ele alınan yapıya ait spektrum değerlerinin tespit edilmesidir. Bu değerler, sözkonusu yapıyla aynı geometrik özellikte ve aynı frekans ve sönüm oranı değerine sahip, fakat rijit bir blok şeklindeki referans yapının, gerçek yapıyı etkileyen rüzgar etkisi altında yaptığı maksimum tepe deplasman ve ivmeleri şeklinde, 6. bölümde tanımlanmıştır.

Bu problem için, 7. Bölümde, değişik özelliklerdeki referans yapılar ve rüzgar etkileri için grafikler halinde hazırlanmış olan spektrum değerleri arasından Şekil 7-1 den deplasman için Şekil 7-19 dan ise ivme için spektrum değerleri alınmıştır. Bu diyagramlar kullanılırken $B = H/4$ için çizilmiş olan eğriler tercih edilmiştir. Elde edilen bu değerler Tablo 9-6 da gösterilmiştir.

Tablo 9-6. Örnek yapının doğal frekanslarına karşılık gelen spektrum değerleri.

	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
Deplasman m	12704.36	1756.562	611.4	309.0506	176.6409
İvme (m/sn^2)	9254.023	3636.33	2051.541	1378.399	961.4693

Daha sonra bu spektrum değerlerinden gerçek yapıya ait maksimum deplasman ve ivme değerlerine geçmek amacıyla modal katkı veya düzeltme faktörlerinin hesaplanması gerekmektedir. (8.16) ifadesiyle verilen bu katsayı (8.14) ve (8.15) ifadeleriyle verilen iki sınır değer arasında bulunmaktadır. Bu sınır değer ifadelerini hesaplamak (8.16) ifadesini hesaplamaktan daha kolaydır. Eğer sadece deplasman ile ilgileniliyorsa yüksek modların katkısı önemsizdir ve sadece birinci mod için hesap yapılabilir. Bu durumda, sınır değerler birbirlerine çok yaklaşır. Böylece diğerinden bir miktar büyük sonuç vermesi nedeniyle (8.14) ifadesi modal katkı veya düzeltme faktörü olarak kullanılabilir. Bu ifadelerin içindeki toplam terimlerini hesaplayabilmek amacıyla basit bir bilgisayar programı hazırlanmış ve bu şekilde (8.14), (8.15) ve (8.16) ifadeleri bu problem için hesaplanmıştır. Tablo 9-7 de bu yapıya ait beş mod için hesaplanmış olan, sırasıyla; modal düzeltme katkı faktörünün iki sınır değeri (k_1, k_2) ve bütün modlar için sadece ivme hesabında geçerli olan modal katkı veya düzeltme faktörü değeri (k_a) gösterilmektedir.

	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
k_1	0.8769	0.9051	-0.8989	0.8562	0.7925
k_2	0.8430	-0.2246	0.2043	-0.0576	0.1144
k_a	0.8700	0.8715	-0.8749	0.8422	0.7862

Ancak, elde edilmek istenen sonuç yapının maksimum ivme değeri ise bu durumda yüksek modların etkisini ihmal etmek mümkün olamamaktadır. Yüksek modlara göre hesap yapılması halinde ise iki sınır değer arasında açıldığı Tablo 9-7 den de görülebilmektedir. Bu durumda (8.16) ifadesi ile verilen gerçek modal katkı veya düzeltme faktörlerinin kullanılması gerekir. Bu ifadenin (6.45) ile verilen orjinal hali elde edilirken gerek rüzgar spektrumu gerekse koherans fonksiyonu ifadelerinde birtakım sadeleştirmeler ve ihmaller yapılmış ve bu durum 6. bölümde açıklanmıştı. Ayrıca (6.45) ifadesinin içinde bulunan integral terimlerinin toplam ifadeleri şeklinde hesaplanması sırasında da bir miktar hata yapılmaktadır. Tablo 9-8 de, Tablo 9-6 da verilen spektrum değerleri ve Tablo 9-7 de verilen modal katkı veya düzeltme faktörleri yardımıyla hesaplanan, yapının tepesindeki maksimum modal deplasman ve ivme değerleri verilmiştir. Bu tablodaki üçüncü satır her moda ait değerlerin Tablo 9-4 deki gerçek modal sonuçlarla karşılaştırılması ile hesaplanmıştır. Son satır ise her modda yapılan hatanın Tablo 9-5 deki o moda kadar hesaplanan toplam değerlere göre yapılan rölatif hatalardır.

Tablo 9-8. Örnek yapının cevap spektrumu yöntemiyle hesaplanan dinamik deplasman ve ivme değerleri.

	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
Dinamik Deplasman (m)	1.1053				
İvme (m/sn^2)	0.8051	0.3169	-0.1795	0.1161	0.0756
Modal Hata (%)	0.9	5.2	2.6	8.5	12.2
Toplam Hata (%)	0.9	2.0	0.5	1.0	0.9

	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
Toplam Hata (%)	0.9	2.0	0.5	1.0	0.9

Tablo 9-6 da verilen spektrum değerleri ve Tablo 9-7 de verilen düzeltme faktörleri kullanılarak hesaplanan modal ivme değerleri (8.20) ifadesi yardımıyla toplanarak yapının tepesindeki toplam en yüksek ivme değeri bulunabilir. Elde edilen toplam deplasman ve ivme değerleri toplu olarak yazılırsa, sonuçta yapılan hatalar aşağıda verildiği gibi oldukça küçüktür.

$$y_{st}(H) = 0.9903m. \quad (\%0.0)$$

$$y_{din}(H) = 1.1053m. \quad (\%1.9)$$

$$a(H) = 0.8944m. \quad (\%2.7)$$

BÖLÜM 10

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, rüzgar etkisi altındaki yüksek yapıların deplasman ve ivme olarak dinamik cevabının hesaplanabilmesini sağlayan bir cevap spektrumu yöntemi sunulmuştur. Bu yöntem deprem etkilerinin hesaplanmasını sağlayan cevap spektrumu yöntemine benzer bir yöntem olarak belirtilmektedir. Bu yöntemle ait ifadeler elde edilirken sadece rüzgarın esiş yönünde yapıya gelen etkiler ve bu yöndeki titreşimler dikkate alınmıştır.

Çözüm, özellikleri belli bir referans yapının belirli bir rüzgar altındaki cevabının bir modal katkı veya düzeltme faktörü ile çarpılarak gerçek yapının cevabını bulmak şeklinde özetlenebilir. Sözkonusu referans yapı, temelden bir dönel yay ve titreşim söndürücü ile bağlanmış, dikdörtgen enkesitli, tek serbestlik dereceli, birim kütle dağılımına ve sonsuz rijit olması nedeniyle doğru formunda bir mod şekline sahip, dikdörtgen enkesitli bir blok olarak ele alınmıştır. Bu yapının değişik rüzgar etkileri altındaki maksimum deplasman ve ivme değerleri olan cevap spektrumları, rüzgarın ve yapısal parametrelerin 108 değişik kombinasyonuna göre belli bir aralıktaki yapı frekansı için bir bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmış, yatay eksen yapı frekansını, düşey eksen ise referans yapının en büyük deplasman veya ivme cevabını göstermek üzere diyagramlar halinde verilmiştir. Bu hesaplamalar yapının şehir merkezinde olduğu varsayımı ile yapılmıştır.

Deplasman veya ivme hesaplamalarında kullanılacak ve yüksek yapılara ait her mod için kabul edilebilir yaklaşıklıkta sonuç veren bir modal katkı veya düzeltme faktörünün yanısıra, bu katsayının sonuçlarının, arasında çıktığı iki sınır değer ifadesi de elde edilmiştir. Bu sınır değerlerin birinci mod için hesap yapılırken birbirine çok yakın çıktığı, fakat ikinci ve yüksek modlarda aranın açıldığı gösterilmektedir. Bu özellikten yararlanarak sadece birinci mod için hesabın yeterli olduğu deplasmanın hesaplanması sırasında modal katkı veya düzeltme faktörü olarak hesabı daha kolay olan bu sınır değer ifadelerinin kullanılması önerilmektedir. Ancak ivme hesaplamalarında yüksek modların etkisinin önemli mertebelerde olması nedeniyle bu yaklaşım kullanılamamaktadır.

Bu çalışmada gösterilmektedir ki referans sisteme ait deplasman ve ivme değerlerinden, bu modal katkı veya düzeltme faktörleri ile çarpılarak, gerçek yapıda oluşan deplasman ve ivmeye geçmek mümkün olmaktadır. Bu modal katkı veya düzeltme faktörleri yapının modlarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Yapının gerçek cevabı ise bu modal değerlerin aynı anda meydana gelmemeleri nedeniyle, kareleri toplamalarının karekökü olarak hesaplanmaktadır. Bölüm 9 da verilmiş olan örnekten görülebileceği gibi bu şekilde hesaplanmış olan sonuçlardaki rölatif hata miktarı %5 den daha az çıkmaktadır.

Bu yöntemin her tip çevre koşulu içinde bulunan yüksek yapı için kullanılabilmesini sağlamak amacıyla değişik bölgeler için spektrum değerlerinin çoğaltılması gerekmektedir. Ayrıca yöntem diğer tip yapılara da uygulanabilecek şekilde geliştirilebilir.

Dinamik rüzgar etkisi altındaki yapılarda rüzgarın esiş yönüne dik yönde oluşan ivme değerlerinin birçok defa rüzgar yönünde oluşana göre daha büyük olduğu bu konuda yapılan çalışmalarda belirtilmektedir. Rüzgar kuvvetlerinin spektral yoğunluk fonksiyonu olarak rüzgara dik yöndeki ifadenin alınması ve cevap spektrumlarının yeniden hesaplanması sonucunda, modal katkı veya düzeltme faktörlerinin ise bu yeni spektral yoğunluk fonksiyonunun özelliklerine göre tekrar düzenlenmesi ile yapının bu yöndeki cevabını hesaplayabilecek şekilde yöntem daha da geliştirilmiş olacaktır.

Birçok ülkenin yapı boyutlandırılması ile ilgili şartnamelerinde rüzgar ve deprem yüklerinin hangisi yapıyı daha çok etkiliyorsa, boyutlandırmanın o yüke göre yapılması istenmektedir. Ancak bu konuda bir karar verebilmek için hesabın bir yere kadar iki yük durumu için de yapılması gerekir. Burada rüzgar etkileri için geliştirilmiş olan yöntem, deprem etkileri için geliştirilmiş olan yönteme çok benzemektedir. Ancak gerek modal katkı veya düzeltme faktörleri gerekse spektrum diyagramları farklı farklıdır. Bu katsayı veya diyagramlar arasında belirlenecek bir ilişki ile hangi etkinin daha büyük sonuç vereceğini detaylı hesap yapmadan tespit etmek mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] DAVENPORT, A. G., "The Application of Statistical Concepts To The Wind Loading of Structures", Proc., Inst. of Civil Eng., London, Vol. 19, pp. 449-472, 1961
- [2] SIMIU, E., "Logaritmik Profiles and Design Wind Speeds", Jour. of Eng. Mech. Div., ASCE, v.99, EM5, October 1973, pp. 1073-1083.
- [3] SIMIU, E. and SCANLAN, R.H., "Wind Effects on Structures, an Introduction to Wind Engineering", John Wiley and Sons, New York, 1978.
- [4] NBCC, National Building Code of Canada, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada., 1985
- [5] ANSI, American National Standard, "Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures", American National Standards Institute, Inc., New York, NY, ANSI A58.1-1982.
- [6] BIETRY, J., SACRE, C., SIMIU, E., "Mean Wind Profiles and Changes of Terrain Roughness", Jour. of the Struc. Div., ASCE, Vol. 104, October 1978, pp.1585-1593.
- [7] SIMIU, E., PATEL, V.C., and NASH, J.F., "Mean Wind Profiles in Hurricanes", Jour. of Eng. Mech. Div., ASCE, 102, No. EM2, Proc.Paper 12044, April 1976, pp. 265-273
- [8] SINCLAIR, R.W., ANTHES, R.A., and PANOFSKY, H.A., "Variation of The Low Level Winds During th Passing of a Thunderstorm Gust Front", NASA Contractor Report, No. Cr-2289, 1973
- [9] SIMIU, E., "Wind Spectra and Dynamic Alongwind Response", Jour. of Struc. Div., ASCE, v.100, ST9, Sept. 1974, pp. 1877-1910.
- [10] DAVENPORT, A.G., "The Dependence of Wind Load Upon Meteorological Parameters", Proc. of the International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures, University of Toronto Press, Toronto, Canada, 1968, pp.19-82.
- [11] VICKERY, B.J., "On the Reliability of Gust Loading Factors", Proc. of the Technical Meeting Concerning Wind Loads on Buildings and Structures, National Bureau of Standards, Building Science Series 30, Washington, DS, 1970, pp. 93-104
- [12] A Committee on Wind Effects, "Wind Loading and Wind-Induced Structural Response", A State-Of-The-Art Report Published By ASCE, 1978
- [13] LIN, Y.K., "Probabilistic Theory of Structural Dynamics", Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York, 1976

- [14] TS498, "Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri", Türk Standartları Enstitüsü, Kasım, 1987
- [15] ISYUMOV, N. and TSCHANZ, T., "Building Motion in Wind", Proceedings of a session sponsored by the Aerodynamic Committee of the Structural Division of ASCE, New York, 1986
- [16] ISLAM, M.S., ELLINGWOOD, B., COROTIS, R.B., "Transfer Fonction Modelling of Dynamic Wind Loads on Buildings", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, No.7, July, 1990
- [17] ISLAM, M.S., ELLINGWOOD, B., COROTIS, R.B., "Dynamic Response of Tall Buildings to Stochastic Wind Load", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.116, No.11, November, 1990.
- [18] KAREEM A., "Fluctuating Wind Loads on Buildings", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.108, No.EM6, December, 1982.
- [19] SIMIU, E., "Equivalent Static Wind Loads for Tall Building Design", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.102, No.ST4, April, 1976
- [20] KAREEM, A., "Wind-Excited Response of Buildings in Higher Modes", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.107, No.ST4, April, 1981
- [21] VICKERY, B.J., "Fluctuating Lift and Drag on A Long Cylinder of Square Cross-Section in A Smooth and in A Turbulent Stream", Journal of Fluid Mechanics, No.25, 1966.
- [22] KAREEM, A., "Measurement and Analysis of Pressure Fluctuations on Prismatic Structures in Turbulent Boundary Layer Flows", Journal of Wind Engineering, No.37, Kyoto, Japan, October, 1988.
- [23] KAREEM, A., CERMAK, J.E., "Pressure Fluctuations on A Square Building Model in Boundary-Layer Flows", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, No.16, Elsiver Science Publishers, 1984.
- [24] VELOZZI, J., COHEN, E., "Gust Response Factors", Journal of Structural Division, ASCE, Vol.97, No.ST6, June, 1968
- [25] SIMIU, E. and LOZIER, D.W., "The Buffeting of Tall Structures by Strong Winds", Technical Report, US National Bureau of Standards, October 1975.
- [26] FOUTCH, D.A., ŞAFAK, E., "Torsional Vibration of Wind-Excited Symmetrical Structures", Jornal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier Scientific Publishing Company, No.7, 1981.
- [27] FOUTCH, D.A., ŞAFAK, E., "Torsional Vibration of Along-Wind Excited Structures", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.107, No.EM2, April, 1981.
- [28] ŞAFAK, E., FOUTCH, D.A., "Coupled Vibrations of Rectangular Vuildings Subjected to Normally-Incident Random Wind Loads", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier Science Publishers, No.26, 1987.

- [29] YANG, J.N., LIN, Y.K., SAMALI, B., "Coupled Motion of Wind-Loaded Multi-Story Building", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.107, No.EM6, December, 1981.
- [30] KAREEM, A., "Acrosswind Response of Buildings", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST4, April, 1982.
- [31] DAVENPORT, A.G., "Gust Loading Factors", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.93, No.ST3, June, 1967.
- [32] SOLARI, G., "Equivalent Wind Spectrum Technique: Theory and Application", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.6, June, 1988.
- [33] SOLARI, G., "Wind Response Spectrum", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.115, No.9, September, 1989.
- [34] BOGGS, D.W., PETERKA, J.A., "Aerodynamic Model Tests of Tall Buildings", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.115, No.3, March, 1989.
- [35] HANSEN, R.J., REED, J.W., VANMARCKE, E.H., "Human Response to Wind-Induced Motion of Buildings", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.99, No.ST7, July, 1973.
- [36] NEWMARK, N.M., "Relation Between Wind and Earthquake Response of Tall Buildings", Proceedings, 1966 Illinois Structural Engineering Conference, University of Illinois, Urbana, Illinois., 1966
- [37] CEVALLOS-CANAU, P.J., "The Commonality of Earthquake and Wind Analysis", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois., 1980
- [38] VICKERY, B.J., and KAO, K.H., "Drag of Along-Wind Response of Slender Structures", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.98, No. ST 1, Proc. Paper 8635, January 1972, pp. 21-36
- [39] KAO, K.H., "Measurements of Pressure/Velocity Correlation on a Rectangular Prism in Turbulent Flow", Engineering Science Research Report BLWT-2-20 , University of Western Ontario, London, Canada, 1971.
- [40] BEARMAN, P.W., "Some Measurements of the Distortion of Turbulence Approaching a Two Dimensional Body", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 53, Part 3, pp. 451-467, 1972
- [41] PETTY, D.G., "The Distortion of Turbulence by a Circular Cylinder", Symposium on External Flows, University of Bristol, 4-6, July, 1972.
- [42] BATCHELOR, G.K., "The Theory of Homogenous Turbulance", Cambridge University Press, Cambridge, England, 1953.
- [43] VAICAITIS, R., SHINOZUKA, M., and TAKENO, M., "Response Analysis of Tall Buildings to Wind Loading", Technical Report No. 1, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia University, July 1973, New York, p. 74.

- [44] LAM PUT , R., "Dynamic Response of a Tall Building to Random Wind Loads", Proceedings International Conference on wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, Japan, 1971, pp.III - 4.1 - 11
- [45] LUMLEY, J.L., and PANOFISKY, H.A., "The Structures of Atmospheric Turbulence", John Wiley & Sons, 1964
- [46] HOLMES, J.D., "Pressure Fluctuations on a Large Building and Along Wind Structural Loading", International Journal of Industrial Aerodynamics
- [47] ROBSON, J.D., "An Introduction to Random Vibration", Elsiver Publishing Co., 1964, p.91
- [48] DAVENPORT, A. G., "The Distribution of Largest Value of a Random Function With Application to Gust Loading", Proc., Inst. of Civil Eng., London, Vol. 28, pp. 187-196, 1964
- [49] HURTY, W.C., and RUBINSTEIN, M.F., "Dynamics of Structures", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1964
- [50] UZGİDER, E., ŞANLI, A., and ŞAFAK, E., "Response Spectrum Techniques For Predicting Wind-induced Vibrations and Discomfort In High-rise Buildings, Part 1-Alongwind Direction Vibrations", Technical Report of Research Supported by NATO, April 1989.
- [51] ANDERSON, J.C., and BERTERO, V.V., "Seismic Behavior of Multistory Frames Designed By Different Philosophies", Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley, October 1969.
- [52] Structural Research and Analysis Corporation, "COSMOS/M Finite Element System User Guide", Santa Monica, CA., April 1990.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Kutlu ŞANLI 1961 yılında Bursa'da doğmuştur. İlk öğrenimini Nazilli Beş Eylül İlkokulunda yapmıştır. Orta öğrenimini Balıkesir Atatürk Ortaokulu ve Muharrem Hasbi Koray Liselerinde, 1978 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesine girmiştir. 1982 yılında burayı bitirdikten sonra İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır. Aynı dönemde İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans yapmaya hak kazanmıştır. 1984 yılında Yüksek Mühendis Ünvanını almıştır. Aynı yıldan beri, kayıtlı olduğu İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünün Doktora Programı kapsamı içinde çalışmaktadır.

Evli ve bir çocuk babasıdır.

T. C.
Yükseköğretim Bakanlığı
Dokümantasyon